

文章编号: 1006 - 2106(2013) 03 - 0011 - 05

高速铁路松软地基沉降控制与测试分析^{*}

廖进星^{**}

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 研究目的: 高速铁路对路基工程工后沉降控制十分严格, 路基工程工后沉降主要为铁路铺轨完成后地基的残余沉降。为满足高速铁路路基工后沉降控制要求, 需选择合适的地基沉降计算方法, 并根据沉降计算结果选取合理的地基加固措施。

研究结论: 软土、松软土等高压缩性地基和中等压缩性黏性土地基压缩层计算厚度按附加应力等于 0.1 倍自重应力确定; 非黏性土地基和低压缩性黏性土地基压缩层计算厚度按附加应力等于 0.2 倍自重应力确定。CFG 桩复合地基加固范围的沉降按土体复合压缩模量法计算, 下卧层沉降按等效实体法计算时, 计算结果与实测沉降较接近。钻孔灌注桩板桩结构地基加固范围沉降按桩基理论计算, 下卧层沉降按应力扩散法计算时, 计算结果与实测沉降较接近。

关键词: 高速铁路; 工后沉降; 沉降控制; 地基处理; 沉降监测

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A

Control , Test and Analysis of Soft Foundation of High - speed Railway

LIAO Jin - xing

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd ,Wuhan ,Hubei 430063 ,China)

Abstract: Research purposes: The high - speed railway has a very strict requirement on the post - construction settlement of the foundation and the post - construction settlement of the foundation belongs to the residual settlement after rail laying. The appropriate calculation method for the foundation settlement should be chosen to satisfy the requirement of the post - construction settlement of high - speed railway , and the appropriate measures should be taken according to the calculation result of the settlement.

Research conclusions: The calculation thicknesses of the compression layer of the soft - soil high - compression foundation and the medium - compression clay foundation should be determined according to that the additional stress is equal to the 0.1 time of its stress. The calculation thicknesses of the compression layer of the non - clay foundation and the low - compression clay foundation should be determined according to that the additional stress is equal to the 0.2 time of its stress. The settlement in the reinforced range of the CFG pile composite foundation should be calculated by using the soil composite compression modulus method. When the settlement of the subjacent bed is calculated by using the equivalent entity method , its calculation result is rather closed to the real settlement. When the settlement in the reinforced range of the bored cast - in - place pile structure foundation is calculated with the pile theory and the settlement of the subjacent bed is calculated by using the stress diffusion method , their calculation results are rather closed to the measured settlement.

Key words: high - speed railway; post - construction settlement; deformation control; foundation treatment; settlement observation

^{*} 收稿日期: 2012 - 11 - 20

^{**} 作者简介: 廖进星, 1979 年出生, 男, 工程师。

高速铁路一般指运营速度 ≥ 250 km/h 的铁路^[1]。目前我国投入运营的高速铁路营业里程超过 8 000 km,居世界第一位。

路基作为轨道的基础,是高速铁路的重要组成部分^[2-3]。高速铁路对路基工程沉降控制十分严格,路基工后沉降是控制高速铁路长期高速、平顺、舒适、安全运营关键技术之一,路基填筑完成后的沉降评估预测是控制工后沉降的重要一环^[4]。

为满足高速铁路路基工后沉降控制要求,需选择合适的地基沉降计算方法,并根据沉降计算结果选取合理的地基加固措施。

1 高速铁路路基工后沉降

1.1 工后沉降概念及组成

工后沉降是指路基填筑并铺轨完成后,路基产生的沉降量,也称为“残余沉降量”。路基沉降由路基在列车荷载作用下发生的变形、路基本体在自重作用下的压密变形和地基变形三部分组成,路基工后沉降则是由以上三部分变形产生的残余沉降组成。试验表明,列车动荷载作用下发生的变形一般小于 5 mm 并考虑在轨道结构扣件调整中,静荷载则换算为填土高度纳入计算;路基填土压密变形与路堤填料和压实质量有密切关系,主要通过加强路基填料材质、提高压实度来控制。经验和实测资料表明,路堤填土压密沉降量约为路堤高度的 0.1%~0.5%,且一般在路基施工完成放置一年左右完成,设计计算中,路基填土的压密变形一般不予考虑^[5]。因此,路基工程工后沉降,主要是指铺轨完成后地基的残余变形。

1.2 高速铁路路基工后沉降控制标准

《高速铁路设计规范》^[1]规定:时速 250 km/h 高速铁路有砟轨道路基工后沉降量应 ≤ 100 mm,沉降速率应 ≤ 30 mm/年;桥台台尾过渡段路基工后沉降量应 ≤ 50 mm;时速 300、350 km/h 高速铁路有砟轨道路基工后沉降量应 ≤ 50 mm,沉降速率应 ≤ 20 mm/年;桥台台尾过渡段路基工后沉降量应 ≤ 30 mm。无砟轨道路基工后沉降应满足扣件调整和线路竖曲线圆顺的要求,工后沉降不宜超过 15 mm,沉降比较均匀且调整轨面高程后能满足竖曲线半径的要求时,允许的工后沉降为 30 mm;路基与桥梁、隧道或横向结构物交界处的工后沉降差不应大于 5 mm,不均匀沉降造成的折角不应大于 1/1 000。

高速铁路建设实践表明:路基工程要满足规定的工后沉降控制标准,必须按“土工结构物”进行设计与修建,以工后沉降量作为控制目标,在设计使用年限内应满足以下功能要求:路基结构必须具有足够的刚度

以将列车高速运行时产生的弹性变形控制在一定范围内,强度应能承受列车荷载的长期作用并满足耐久性要求,能抵御各种自然环境作用的长久影响;同时要有良好的地基条件,使工后沉降控制在不影响列车正常、安全行驶的范围。

2 高速铁路地基处理技术与沉降控制计算

2.1 高速铁路地基处理技术简介

我国在充分调研国外高速铁路设计标准、修建技术的基础上,进行了大量科学研究和现场试验,对高速铁路路基地基加固与沉降控制形成了一套较成熟的技术。国内高速铁路应用较成熟的地基处理技术主要包括挖除换填、强夯置换、堆载预压、排水固结、复合地基、桩板结构和桩筏结构等。

挖除换填、强夯置换主要用于浅层软弱地基处理。堆载预压一般和其他地基处理措施联合应用。排水固结法工程造价低,但需要较长的工期,往往需要与超载预压等联合使用,不适用于无砟轨道高速铁路软土路基;应用于有砟轨道高速铁路软土路基时也应慎重,特别是有机质含量较高、次固结沉降较大的深厚层软土地基不宜采用该技术。复合地基包括柔性桩(深层搅拌桩、旋喷桩等)复合地基,半刚性桩(CFG 桩、螺杆桩)桩网复合地基,刚性桩(管桩、预制混凝土桩)桩网复合地基等。桩板结构包括(CFG、管桩、预制混凝土桩)复合桩板结构、钻(挖)孔桩支承桩板结构等。

地基加固处理措施按照“安全可靠、经济合理、施工可控、技术先进成熟”的原则,按施工摆放、换填、预压、复合地基加固的顺序依优选取,主要原则如下。

(1) 有砟轨道高速铁路优先采用技术成熟、经济合理的柔性桩(深层搅拌桩、水泥砂浆桩)复合地基加固措施,辅以散体材料桩(碎石、砂桩等)复合地基、强夯置换碎石墩、旋喷桩、预应力管桩、超载预压等措施处理。采用散体材料桩、柔性桩等处理软弱地基时,通常在桩顶设置加筋碎石垫层,由桩、加筋碎石垫层以及桩间土形成复合地基支撑系统。

(2) 无砟轨道高速铁路可采用工艺成熟、技术可靠、经济合理的 CFG 桩为主的措施进行地基加固,辅以预应力管桩、旋喷桩、超载预压、桩板结构等措施处理。半刚性桩、刚性桩通常设置桩帽,以充分发挥桩的承载能力。

(3) 桥路、涵路、堤埝等过渡段以及地基不均匀地段,采用不同地基加固处理措施组合,以桩长、桩间距过渡、预压过渡等进行处理,达到路基沉降均匀过渡和控制工后沉降的目的。纵向、横向不均匀地基的过渡

加固处理如图1、图2所示。

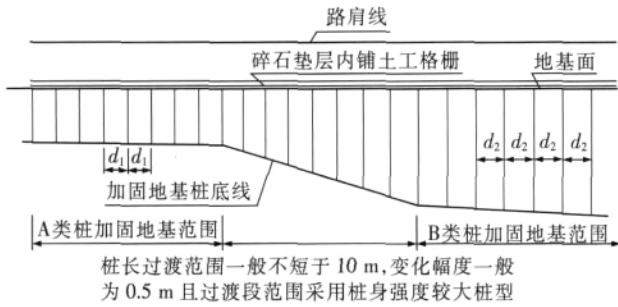


图1 不均匀地基纵向过渡加固示意图

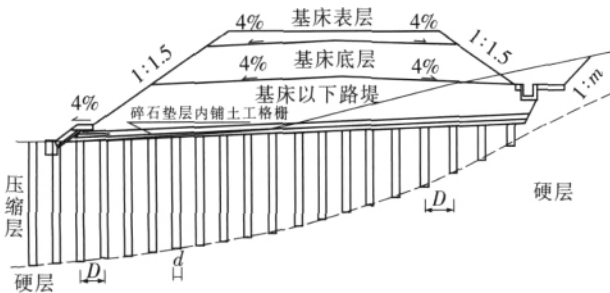


图2 不均匀地基横向过渡加固示意图

2.2 高速铁路地基沉降计算

2.2.1 高速铁路路基土质地基压缩层计算厚度

根据路基填高、地基条件、施工工期组织安排和工程类型分布,在系统分析地基压缩层分布范围、厚度、埋深、分层物理力学指标、变形参数的基础上,进行路基工后沉降计算。

高速铁路路基地基的沉降主要由主固结沉降、次固结沉降组成。软土地基还存在欠固结沉降。主固结变形主要在路基施工及摆置期完成,次固结与欠固结沉降则是长期存在的。

风化岩层地基强度高,地基变形量极小,主要为弹性变形,工后沉降不受控制;松软土质地基的变形主要为塑性变形,地基变形量由地基土性质、厚度决定,合理确定土质地基压缩层计算厚度对控制工后沉降十分关键。

法国高铁以路堤底宽的3倍确定压缩层厚度,日本高铁则采用路堤底宽3~5倍确定压缩层厚度,约是当前我国压缩层计算厚度的2倍以上;德国高铁的压缩层计算厚度和我国铁路规范基本相近。

土质地基压缩层计算厚度的确定,国内主要有铁路规范^[1-6]和《建筑地基基础设计规范》^[7]两种不同的规定。计算分析表明:路基填高大于3.0m时,按《建筑地基基础设计规范》规定的变形比法确定的压缩层厚度小于0.2倍附加应力法确定的压缩层厚度。参考国内外高速铁路无砟轨道路基沉降监测和计算结果,结合铁四院相关科研成果^[8-9],建议高速铁路土质地

基压缩层计算厚度为:软土、松软土等高压缩性地基,以及中等压缩性黏性土地基压缩层计算厚度按附加应力等于0.1倍自重应力确定;低压缩性黏性土和非黏性土地基压缩层计算厚度按附加应力等于0.2倍自重应力确定。

2.2.2 高速铁路路基地基沉降计算方法

高速铁路路基地基沉降量原则上采用分层总和法进行计算。复合地基与桩板结构处理地基,地基的沉降量由加固区沉降量和加固区下卧层沉降量组成。

正常固结、欠固结土采用 $e \sim p$ 曲线、压缩模量 E_s 或 $e \sim \lg p$ 曲线进行主固结沉降量 S_c 计算; Q_{2-3} 黏土等超固结土采用 $e \sim \lg p$ 曲线进行主固结沉降量 S_c 计算。

散体材料桩、柔性桩等复合地基采用复合模量法计算加固区沉降,采用应力扩散法或等效实体法计算下卧层沉降;半刚性桩采用地基分层承载力等效模量法计算加固区沉降,采用应力扩散法或等效实体法计算下卧层沉降;刚性桩与及刚性桩桩板结构采用桩基理论计算下卧层沉降。

2.2.3 工后沉降计算方法

采用分层总和法分别计算有荷载(考虑列车及轨道荷载)和无荷载条件下的主固结沉降值,地基工后沉降量即为扣除施工期已完成沉降后的总沉降量。

(1) 计算天然地基在路基填土、列车及轨道荷载等附加应力下的工后沉降量 ΔS 。地基总沉降中的瞬时沉降(S_d)和次固结沉降(S_s),受地基条件、荷载强度和加荷速率等多种因素影响,以及边界条件所限很难准确由计算确定,因此通过引入沉降经验系数 λ 进行计算。实际总沉降量的计算可采取沉降经验系数 λ 与主固结沉降计算 S_c 确定,即 $S_{\text{总}} = \lambda \cdot S_c$,沉降经验系数 λ 根据规范或可靠的经验值确定。

$$\Delta S = \text{总沉降量 } S_{\text{总}} - \text{施工期沉降量 } S_{\text{施}}$$

$$\text{当 } \lambda \geq 1.0 \text{ 时 } \Delta S = \lambda \cdot S_{\text{有}} - [(\lambda - 1) \cdot S_{\text{无}} + U \cdot S_{\text{无}}]$$

$$\text{当 } \lambda < 1.0 \text{ 时 } \Delta S = \lambda \cdot S_{\text{有}} - \lambda \cdot U \cdot S_{\text{无}}$$

(2) 当天然地基的工后沉降无法满足高速铁路沉降控制要求时,需采用复合地基加固;对于复合地基部分,沉降计算方法主要有复合模量法、应力修正法和桩身压缩模量法等,设计计算时根据复合地基加固的类型及特点选用不同的计算方法。

(3) 加固区下卧层地基工后沉降为有荷条件下沉降量减无荷条件下沉降量。

(4) 淤泥质土、软黏土等饱和土按固结系数及固结时间计算固结度 U_t 。

(5) 非饱和土地基,其沉降完成率计算理论还不够成熟,可通过现场代表性大型载荷试验推测沉降完成率或根据可靠经验确定施工期的沉降完成率。

3 高速铁路地基沉降计算及监测对比分析

3.1 试验工点概述

工点位于石武客运专线 DK 865 + 189 ~ + 896 段 , 地处黄淮冲积平原 , 表层为淤泥质粉质黏土 , 软 ~ 流塑 , 厚 0.8 ~ 1.1 m , $E_s = 2.49$ MPa , $P_s = 0.47$ MPa ; 以下依次为粉质黏土 , 软塑 , 厚 0.7 ~ 9.6 m , $E_s = 5.12$ MPa , $P_s = 0.93$ MPa , $E_s = 5.08$ MPa ; 粉砂夹粉土 , 稍密 , 厚 0.4 ~ 8.6 m , $P_s = 4.34$ MPa , $E_s = 7.51$ MPa ; 细砂 , 中密 , 局部夹粉砂 , 厚 0.3 ~ 14 m , $E_s = 21.35$ MPa , $P_s = 11.02$ MPa ; 粉质黏土 , 硬塑 , 厚 0 ~ 7.6 m , $E_s = 11.47$ MPa ; 细砂、中砂 , 密实 , 局部夹粉砂、粉土 , 厚度大于 15 m。

路堤填高 5 ~ 8 m , DK 865 + 189 ~ + 228、DK 865

+ 857 ~ + 896 桥路过渡段路肩范围地基采用桩板结构处理 , 桩径 1.0 m , 间距 5.0 m , 正方形 , 桩长 25 ~ 31 m ; 路肩范围以外采用 CFG 桩 + 筏板处理 , 桩径 0.5 m , 间距 1.6 m , 正方形 , 桩长 20 m。DK 865 + 228 ~ + 251、DK 865 + 835 ~ + 857 段地基采用 CFG 桩 + 筏板进行过渡处理 , 间距 1.6 m , 正方形 , 桩长 26 m。DK 865 + 251 ~ + 835 段地基采用 CFG 桩加固 , 间距 1.6 m , 正方形 , 桩长 25 m , 桩顶设一层 250 kN 土工格栅垫层。全段路基堆载预压 , 预压期 9 个月^[9]。

3.2 地基工后沉降分析

3.2.1 试验工点实测及预测沉降

试验工点采用沉降板、单点沉降计、路基面沉降观测桩等进行路基沉降监测 , 不同监测断面的实测沉降及预测沉降统计如表 1 所示。

表 1 DK 865 + 189 ~ + 896 段路基实测沉降及预测沉降分析对比表

监测断面	实测最大沉降/mm	预测最终沉降/mm	预测工后沉降/mm	断面间工后沉降折角/‰	施工期完成沉降率/%	预测相关系数 R	备注
DK 865 + 213	19.37	20.41	1.04	0.021	94.9	0.97	过渡段
DK 865 + 235	21.63	23.01	2.41	0.017	93.8	0.93	桩筏结构
DK 865 + 300	21.02	24.46	3.46	0.032	85.8	0.92	桩网结构
DK 865 + 400	18.70	21.72	3.02	0.005	86.1	0.96	桩网结构
DK 865 + 500	18.91	21.90	3.00	<0.001	86.3	0.93	桩网结构
DK 865 + 610	18.78	22.09	3.31	0.003	85.0	0.93	桩网结构
DK 865 + 767	17.01	19.98	2.98	0.028	85.1	0.95	桩网结构
DK 865 + 855	19.80	22.83	3.03	<0.001	86.7	0.99	桩筏结构
DK 865 + 872	20.28	23.81	3.53	0.029	85.1	0.98	过渡段
DK 865 + 890	15.82	18.05	2.23	0.072	87.6	0.97	过渡段

由试验段沉降监测数据及沉降预测结果分析可知:

(1) 采用桩 + 板结构加固的过渡段路基 , 铺轨后实测总沉降量为 15.82 ~ 20.28 mm , 预测工后沉降为 1.04 ~ 3.53 mm , 过渡段路基与桥台工后沉降差为 0.36 ~ 1.3 mm ;

(2) 采用 CFG 桩网复合地基加固的路基 , 铺轨后实测总沉降量为 17.0 ~ 25.4 mm , 预测工后沉降为 1.45 ~ 3.46 mm ;

(3) 所有监测断面的沉降预测相关系数均大于 0.92 , 差异工后沉降折角为 0.001‰ ~ 0.072‰ , 整段路基纵向沉降较均匀 , 满足《客运专线铁路无砟轨道

铺设条件评估技术指南》(铁建设 [2006]158 号)^[10]要求。

3.2.2 实测沉降与理论计算沉降对比分析

CFG 桩复合地基加固范围沉降按土体复合压缩模量^[7]进行计算 , 钻孔灌注桩桩板结构地基加固范围沉降按桩基理论^[11]进行计算 , 下卧层沉降分别采用 boussinesq 法、应力扩散法、等效实体法等分层总和法计算。本工点为无砟轨道高速铁路 , 压缩层计算厚度按地基附加应力与自重应力比值为 0.1 取值 , 试验段不同断面根据实测结果预测的最终沉降量与计算沉降量对比如表 2、表 3 所示。

表 2 CFG 桩加固地基计算沉降与预测沉降对比表

计算断面	计算最终沉降量/mm			预测最终沉降量④/mm	①/④	②/④	③/④
	Boussinesq 理论法①	应力扩散法②	等效实体法③				
DK 865 + 300	49.5	49.0	29.7	24.46	2.02	2.01	1.21
DK 865 + 400	43.7	46.1	27.8	21.72	2.01	2.12	1.27
DK 865 + 500	45.9	46.4	28.2	21.9	2.09	2.11	1.28
DK 865 + 767	45.5	48.1	26.6	19.98	2.27	2.40	1.33

表 3 钻孔灌注桩板结构加固地基计算沉降与预测沉降对比表

计算断面	桩基理论计算最终沉降量/mm			预测最终 沉降量④/mm	①/④	②/④	③/④
	Boussinesq 理论法①	应力 扩散法②	等效 实体法③				
DK 865 + 213	21.5	29.8	4.1	20.41	1.05	1.46	0.2
DK 865 + 872	17.0	20.5	7.1	23.81	0.71	0.86	0.29
DK 865 + 890	16.3	20.1	5.0	18.05	0.90	1.11	0.27

由以上计算分析可知:

(1) CFG 桩网复合地基下卧层变形按 boussinesq 法和应力扩散法计算时,地基总计算沉降量与实测预测沉降量比值为 2.0 ~ 2.4 ,和实测预测值有较大差异;下卧层变形按等效实体法计算时,地基总计算沉降量与实测预测沉降量比值为 1.2 ~ 1.3 ,与实测结果较为接近;

(2) 桩板结构地基下卧层变形按等效实体法计算时,地基总计算沉降量与实测预测沉降量比值为 0.2 ~ 0.3 ,和实测值有很大差异;下卧层变形按 boussinesq 法计算时,地基总计算沉降量与实测预测沉降量比值为 0.71 ~ 1.05 ,总体比实测预测略小;下卧层变形应力扩散法计算时,地基总计算沉降量与实测预测沉降量比值为 0.8 ~ 1.4 ,与实测结果较为接近。

4 结论

(1) 高速铁路地基加固措施宜按施工摆放、换填、预压、复合地基加固的顺序依优选取。

(2) 过渡段和地基不均匀地段,采用不同地基加固处理措施组合、过渡等方法,可实现控制工后沉降且沉降均匀过渡的目的。

(3) 软土、松软土等高压缩性地基和中等压缩性黏性土地基压缩层计算厚度按附加应力等于 0.1 倍自重应力确定;非黏性土地基和低压缩性黏性土地基压缩层计算厚度按附加应力等于 0.2 倍自重应力确定。

(4) CFG 桩复合地基加固范围沉降按土体复合压缩模量计算,下卧层沉降按等效实体法计算时,计算结果与实测沉降较接近。

(5) 钻孔灌注桩板结构地基加固范围沉降按桩基理论计算,下卧层沉降按应力扩散法计算时,计算结果与实测沉降较接近。

参考文献:

[1] TB 10621—2009 ,高速铁路设计规范(试行) [S] .
TB 10621—2009 , Code for Design of High Speed Railway [S].
[2] 郝瀛. 铁道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社 2000.
Hao Ying. Railway Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House ,2000.
[3] 蔡英. 高速铁路路基研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社 ,1995.

Cai Ying. Research of High Speed Railway Subgrade [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press , 1995.
[4] 郭光权. 客运专线路基沉降和变形监控[J]. 铁道工程学报 2007(12) :153 – 157.
Guo Guangquan. Observation of Settlement and Deformation of Subgrade of Railway Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society 2007(12) : 153 – 157.
[5] 赵勇 陈占 徐红星. 高速铁路无砟轨道路基沉降监测和研究[J]. 铁道工程学报 2012(6) :45 – 49.
Zhao Yong ,Chen Zhan ,Xu Hongxing. Control and Evaluation Method for Residual Settlement of High Speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society 2012(6) : 45 – 49.
[6] TB 10001—2005 ,铁路路基设计规范 [S].
TB 10001—2005 , Code for Design on Subgrade of Railway [S].
[7] JGJ 79—2002 ,建筑地基基础设计规范[S].
JGJ 79—2002 ,Code for Design of Building Foundations [S].
[8] 顾湘生 赵新益 孙宏林 等. 软土地基路桥设计参数试验研究报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司 2005.
Gu Xiangsheng , Zhao Xinyi , Sun Honglin , etc. Test Study Report on Soft Soil Foundation Road & Bridge Design Parameters[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey & Design Co. Ltd ,2005.
[9] 陈占 陈远洪 汪莹鹤 等. 石武客运专线粉质土地基处理及工后沉降控制研究报告[R] . 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司 2012.
Chen Zhan , Chen Yuanhong ,Wang Yinghe etc. Report on Silty Soil Foundation Treatment and Residual Settlement Control of Shijiazhuang – Wuhan Passenger Dedicated Line [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey & Design Co. Ltd ,2012.
[10] 铁建设[2006]158 号,客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S] .
Railway Construction [2006] No. 158 , Technical Guideline for Unballasted Track Laying Condition Assesment of Passenger Dedicated Railway Line[S].
[11] TB 10002. 5—2005 ,铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
TB 10002. 5—2005 ,Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert [S].