



T/CECS G XXXX: 2026

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

湿热地区耐久性公路填方路基技术规程

(征求意见稿)

Technical Specification for Durable Highway Fill Subgrade in
Hot and Humid Regions

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

湿热地区耐久性公路填方路基技术规程

Technical Specification for Durable Highway Fill Subgrade in Hot and Humid Regions

T/CECS G: DXX-XX-2026

主编单位：长沙理工大学

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：20XX 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2025 年第二批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（建标协字（2025）310 号）的要求，由长沙理工大学会同有关单位承担《湿热地区耐久性公路填方路基技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程编制组依托 2011 年国家重点基础研究发展计划（973 计划）前期研究专项“南方湿热地区耐久性公路路基湿度平衡理论研究”，历经 15 年，在国家自然科学基金青年项目、面上项目、重点项目和国家重点研发计划等项目的持续支持下，围绕湿热地区公路填方路基的湿度平衡、模量表征与变形控制开展了系统研究。编制组经广泛调查研究，认真总结京港澳高速、沪蓉高速、昌樟高速、大浏高速等湿热地区公路工程实践经验，参考国内外相关先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制本规程。

本规程共分 8 章和 7 个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、路基湿度设计、路基模量设计、路基变形设计、路基改善层设计、施工、质量检验与验收。

第 1 章“总则”规定了本规程的编制目的、适用范围、按公路等级与填料类型的差异化执行要求，以及本规程与相关标准的关系。

第 2 章“术语和符号”给出了湿热地区、耐久性公路填方路基、平衡质量含水率、施工质量含水率、路基结构模量、路基结构永久变形等核心术语和主要符号。

第 3 章“路基湿度设计”规定了施工质量含水率设计与路基运营期湿度设计的要求，建立了以平衡质量含水率为湿度基准的路基湿度设计方法。

第 4 章“路基模量设计”规定了路基土回弹模量试验与预估、路基结构模量计算的方法及模量施工分层检验标准。

第 5 章“路基变形设计”规定了路基土永久变形试验与预估、路基结构永久变形计算、路基结构永久变形控制标准及变形施工分层检验标准。

第 6 章“路基改善层设计”规定了改善层厚度设计、改善层施工验收标准及改善层厚度变更设计。

第 7 章“施工”规定了湿度施工控制、模量与行车荷载永久变形施工控制及改善层施工控制的要求。

第 8 章“质量检验与验收”规定了路基结构模量与路基结构永久变形的原位测试方法及质量检验与验收要求。

附录 A 给出了湿热地区的分布范围；

附录 B 规定了平衡质量含水率的确定方法；

附录 C 规定了路基土动力性能试验方法；

附录 D 给出了路基结构模量取值表及模量设计示例；

附录 E 给出了路基结构变形计算流程及变形设计示例；

附录 F 给出了路基改善层厚度设计、施工验收标准及厚度变更示例；

附录 G 规定了路基综合性能原位测试装备的组成与测试方法。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程的主要技术内容已在湖南、广东、广西、江西、海南、浙江等湿热地区多项高速公路工程中验证应用，可供类似工程参考使用。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由长沙理工大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路8号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或张军辉（地址：湖南省长沙市天心区长沙理工大学云塘校区公路工程实验中心；邮编：410114；传真：0731-85258255；电子邮箱：zjhseu@163.com），以便修订时研用。

主 编 单 位：长沙理工大学

参 编 单 位：重庆交通大学

香港理工大学

华东交通大学

湖南省高速公路集团有限公司

广西交科集团有限公司

主 编：张军辉

主要参编人员：

主 审：黄晓明

参与审查人员：

参 加 人 员：

目 次

1 总则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 路基湿度设计.....	6
3.1 一般规定.....	6
3.2 施工质量含水率设计.....	6
3.3 路基运营期湿度设计.....	7
4 路基模量设计.....	8
4.1 一般规定.....	8
4.2 路基土回弹模量试验与预估.....	8
4.3 路基结构模量计算.....	9
4.4 模量施工分层检验标准.....	10
5 路基变形设计.....	11
5.1 一般规定.....	11
5.2 路基土永久变形试验与预估.....	11
5.3 路基结构永久变形计算.....	12
5.4 路基结构永久变形控制标准.....	12
5.5 变形施工分层检验标准.....	13
6 路基改善层设计.....	14
6.1 一般规定.....	14
6.2 改善层厚度设计.....	14
6.3 改善层施工验收标准.....	15
6.4 改善层厚度变更设计.....	15
7 施工.....	17
7.1 一般规定.....	17
7.2 湿度施工控制.....	17
7.3 模量与变形施工控制.....	17
7.4 改善层施工控制.....	18

8 质量检验与验收.....	19
8.1 一般规定	19
8.2 路基结构模量测试.....	19
8.3 路基结构永久变形测试.....	19
附录 A 湿热地区分布	21
附录 B 平衡质量含水率确定方法.....	23
附录 C 路基土动力性能试验方法	28
附录 D 路基结构模量取值表及模量设计示例	32
附录 E 路基结构变形计算流程及变形设计示例.....	35
附录 F 改善层厚度设计、施工验收标准及厚度变更示例.....	42
附录 G 路基综合性能原位测试装备原位测试	49
附件：《湿热地区耐久性公路填方路基技术规程》条文说明	52
1 总则.....	53
2 术语和符号	54
3 路基湿度设计	57
4 路基模量设计	62
5 路基变形设计	67
6 路基改善层设计	73
7 施工.....	75
8 质量检验与验收.....	77
本标准用词用语说明.....	81

1 总则

1.0.1 为规范湿热地区耐久性公路填方路基的设计、施工及检测，解决湿热地区路基因湿度不稳定、刚度参数不合理、变形控制脱节导致的使用寿命偏短问题，建立“湿度稳定、刚度可知、变形可控”的耐久性公路填方路基设计体系，统一设计方法、技术指标与验收要求，提升路基性能与耐久性，制订本规程。

1.0.2 本规程适用于湿热地区各等级公路新建、改扩建填方路基的设计、施工与质量检验。挖方路段路床的设计与施工可参照执行。

1.0.3 本规程按公路等级和填料类型差异化执行：高速公路、一级公路和二级公路应执行本规程的全部规定，三级公路应执行本规程的主要规定，四级公路可执行本规程的基本条款。各章规定的具体适用范围按相应章节执行。

1.0.4 湿热地区红黏土、高液限土、粉土、软土、碎石土、土石混填及软岩等典型填料填方路基工程，可按本规程相关规定执行。海外类似湿热地区公路工程可参考使用。

1.0.5 耐久性公路填方路基的设计目标为：路面设计使用年限内，路基湿度稳定于平衡质量含水率附近，路基结构模量不低于设计规定值，路基结构永久变形不超过控制标准，路面结构不因路基模量衰减或变形过大而过早破坏。

1.0.6 湿热地区耐久性公路填方路基的设计、施工与质量检验，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 湿热地区 hot-humid region

全年气候温暖、水分条件充足，多年平均1月气温大于0℃、多年平均气温不低于14℃，且多年平均年降雨量大于多年平均年蒸发量或多年平均年降雨量不低于800 mm的地区，具体范围见附录A。

2.1.2 耐久性路基 durable subgrade

在路面设计使用年限内保持湿度稳定、模量可靠、变形可控的路基。

2.1.3 平衡质量含水率 equilibrium gravimetric water content

路基投入运营后，在气候、地下水等因素长期作用下，含水率演变至年际平均变化趋缓、年内随季节性气候变化周期性波动的动态平衡状态时的质量含水率，以连续5年内路基代表湿度月平均值的最大值作为控制值。

2.1.4 施工质量含水率 construction gravimetric water content

兼顾可压实和强度要求的湿热地区施工期路基含水率范围，下限为最佳含水率，上限基于压实度和CBR双控确定，并经现场试验段确定的填筑施工质量含水率控制范围。

2.1.5 路基结构模量 structural modulus of subgrade

考虑路基湿度、干密度与应力状态时空非均匀分布以及路面结构约束影响的路基结构整体等效模量。

2.1.6 路基结构永久变形 permanent deformation of subgrade structure

运营期行车荷载反复作用引起的路基顶面累积竖向变形，不含路基自重引起的本体沉降及地基沉降变形。

2.1.7 永久变形控制标准 control standard for permanent deformation

以基层、底基层不发生疲劳开裂为约束，由层底容许拉应力反推路基顶面容许的最大永久变形限值。

2.1.8 改善层 improvement layer

设置于路床上部的路基性能增强结构层，用于在不满足模量和变形设计指标或路堤检验不通过时提升路基结构模量、减小路基结构永久变形。

2.1.9 基于轴平移技术的快速压力板仪 rapid pressure plate extractor based on axis-translation technique

采用轴平移技术控制基质吸力，以亲水微孔膜与致密透水石组成水气交换结构，通过自动水体积量测、循环气泡冲刷和分级气压控制实现土水特征曲线连续自动测试的仪器，较传统压力板仪测试时间可缩短 95%。

2.1.10 路基综合性能原位测试装备 in-situ comprehensive performance testing equipment for subgrade

能同步施加模拟行车荷载的循环动载与模拟路面自重约束的静载，并内置路基力学参数反演算法，现场采集路基回弹模量模型参数与路基永久变形模型参数的原位测试装备。

2.2 符号

2.2.1 湿度参数：

w ——质量含水率；

w_e ——平衡质量含水率；

ρ_d ——干密度（ g/cm^3 ）；

G_s ——土粒比重；

I_p ——塑性指数（%）；

$P_{0.075}$ ——细粒含量（%）；

θ_s 、 θ_r ——饱和和体积含水率、残余体积含水率；

A 、 n ——基于 VG 模型的进气值相关参数（kPa）、曲线形状参数；

P ——年均降雨量（mm）；

H_{groud} ——地下水位深度（m）；

E_t ——年均蒸发量（mm）；

K ——潮湿系数。

2.2.2 模量参数:

M_R ——路基土回弹模量（MPa）；

k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 ——路基土回弹模量模型参数；

$\overline{k_0}$ ——温度修正后的回弹模量模型参数 k_0 ；

E_0 ——平衡湿度状态下路基结构（设计）模量（MPa）；

M_{R0} ——最佳含水率下的路基结构模量（MPa）；

k_s ——路基土回弹模量湿度调整系数；

E_{eq} ——改善层与路基综合模量（MPa）；

$E_{standard}$ ——路面设计规范要求的路基设计模量（MPa）；

E_{target} ——施工期路床顶面模量检验标准（MPa）。

2.2.3 变形参数:

ω ——路基土永久变形（%）；

α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 ——路基土永久变形模型参数；

N ——循环荷载作用次数（次）；

PD ——路基永久变形（mm）；

$[PD_{max-subb}]$ 、 $[PD_{max-base}]$ ——按底基层、基层不发生疲劳开裂控制的路基顶面容许永久变形（mm）。

2.2.4 其他参数:

σ_3 、 σ_d 、 σ_c ——围压、循环应力、接触应力（kPa）；

θ ——体应力（kPa）；

τ_{octD} 、 τ_{octS} ——动、静八面体剪应力（kPa）；

p_a ——标准大气压（kPa），取 101.3kPa；

K_0 ——静止土压力系数；

σ_{D1} 、 σ_{D3} ——行车荷载引起的竖向、水平动应力（kPa）；

$\sigma_{dynamic}$ 、 σ_{static} ——路基综合性能原位测试装备的动载、静载应力（kPa）。

E_{pave} 、 E_{base} 、 E_{subb} ——面层、基层、底基层的材料模量（MPa）；

H_{pave} 、 H_{base} 、 H_{subb} ——面层、基层、底基层的厚度（cm）；

$[\sigma_{subb,max}]$ 、 $[\sigma_{base,max}]$ ——底基层、基层层底容许拉应力（MPa）；

H ——路面结构总厚度（m）；

V ——行车速度（km/h）；

T ——设计地区近 10 年极端最高气温（℃）；

T_{test} ——室内试验温度（℃）；

ΔT_{max} ——最大允许温差（℃）；

α ——回弹模量温度影响土类修正系数。

3 路基湿度设计

3.1 一般规定

3.1.1 路基湿度设计应区分施工期和运营期进行两阶段设计，合理控制施工质量含水率，确定运营期长期平衡湿度状态，为路基模量与变形设计提供湿度依据。

3.1.2 路基湿度设计应收集下列资料：

- 1 沿线连续不少于 15 年的降雨量、蒸发量、气温、相对湿度等气象资料；
- 2 勘察期地下水位、历史地下水位及其季节变化资料；
- 3 地表汇水、地下排水及路面排水条件；
- 4 路基填料颗粒组成、液限、塑限、比重、击实特性和承载比（CBR）等物理力学参数；
- 5 改扩建工程既有路基含水率、地下水位、排水设施及水损害调查资料。

3.1.3 路基应采取完善的地表和地下防排水措施，控制运营期路基湿度及其变化幅度。防排水设计应符合《公路排水设计规范》（JTG D33）的有关规定。

3.2 施工质量含水率设计

3.2.1 施工质量含水率设计适用于各等级公路。施工质量含水率应采用压实度与 CBR 双控确定设计范围，并经现场试验段确定施工质量含水率控制范围。

3.2.2 施工质量含水率设计范围应按以下步骤确定：

- 1 根据湿土法重型击实试验确定最佳质量含水率、最大干密度及击实曲线；
- 2 以最佳质量含水率为起点，根据击实曲线和相应填筑部位的压实度要求，确定最佳质量含水率湿侧满足压实度要求的质量含水率范围；
- 3 根据 CBR 与初始质量含水率关系曲线和相应填筑部位的 CBR 要求，确定满足 CBR 要求的质量含水率范围；
- 4 取第 2 款与第 3 款确定的质量含水率范围交集，作为施工质量含水率设计范围。

试验方法与过程应符合现行《公路土工试验规程》（JTJ 3430）的有关规定。

3.2.3 施工前应通过现场试验段在设计范围内确定施工质量含水率控制范围以及相应的松铺厚度、压实机械组合和碾压工艺，试验段实施应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTJ/T 3610）的有关规定。

3.3 路基运营期湿度设计

3.3.1 路基运营期湿度设计应确定长期平衡湿度状态。

3.3.2 高速公路、一级公路、二级公路及三级公路（细粒土路基）路基平衡质量含水率，应按附录 B.1 确定；

3.3.3 三级公路（粗粒土路基）及四级公路应采用现行《公路路基设计规范》（JTJ D30）规定的方法确定平衡湿度状态。

4 路基模量设计

4.1 一般规定

4.1.1 路基模量设计应以刚度可知为目标，建立“室内试验、结构计算、原位检验”相衔接的模量确定体系。路基模量分为路基土回弹模量、路基结构模量和施工分层控制模量标准。

4.1.2 本章适用于各级公路结构模量和分层检验指标的确定。

4.1.3 路基结构模量不应低于《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）及《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG D40）对路基模量的要求值；低于要求值时，应采取固化、换填、提高压实度或增设改善层措施；应遵循下列原则：

1 采用固化、换填、提高压实度处理，应取处理后路基土重新开展路基湿度设计确定施工质量含水率和平衡质量含水率，并再一次进行路基模量验算；

2 采用增设改善层方式，应按本规程第 6.2 节进行改善层厚度设计。

4.2 路基土回弹模量试验与预估

4.2.1 对于高速公路、一级公路和二级公路，应采用室内动三轴试验确定路基土回弹模量模型参数。试验设备与制样、加载及量测的基本要求应符合《公路土工试验规程》（JTG 3430）T 0194 动三轴试验的规定，加载时长、加载序列具体要求见附录 C.1。

4.2.2 动三轴试验应设置下列工况：

- 1 设计状态工况（路床）：实际路床填料，路床平衡质量含水率、压实度；
- 2 施工检验工况（路床）：实际路床填料，路床施工控制含水率、压实度；
- 3 施工检验工况（路堤）：实际路堤填料，路堤施工控制含水率、压实度。

4.2.3 完成试验后，采用线性回归依次拟合 4.2.2 条规定的工况下路基土回弹模量模型参数，拟合以各加载序列回弹模量计算值与实测值相一致为原则：

$$M_R = k_0 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_1} \left(\frac{\tau_{octD}}{p_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{octS}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4-1)$$

式中： M_R ——路基土回弹模量（MPa）；

k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 ——回弹模量模型参数，由试验拟合确定；

θ ——体应力（kPa），三轴试验条件下 $\theta = 3\sigma_3 + \sigma_d + \sigma_c$ ；

τ_{octD} ——动八面体剪应力（kPa），三轴试验条件下 $\tau_{octD} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_d$ ；

τ_{octS} ——静八面体剪应力（kPa），三轴试验条件下 $\tau_{octS} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_c$ ；

p_a ——标准大气压（kPa），取 101.3kPa；

σ_3 、 σ_d 、 σ_c ——分别为围压、循环应力与接触应力（kPa）。

4.2.4 黏性土、粉土等细粒土需对结果进行温度修正。对于设计状态工况结果，当室内试验温度低于设计地区近 10 年极端最高气温时，应按（4-2）对 k_0 进行修正；对于施工检验工况，当室内试验温度高于设计地区近 10 年极端最高气温时，应按式（4-3）对 k_0 进行修正。

$$\bar{k}_0 = \left[1 - \alpha \frac{\min(\Delta T_{max}, T - T_{test})}{100} \right] k_0 \quad (4-2)$$

$$\bar{k}_0 = \left[1 + \alpha \frac{\min(\Delta T_{max}, T_{test} - T)}{100} \right] k_0 \quad (4-3)$$

式中， T ——设计地区的近 10 年最大温度，℃；

T_{test} ——试验时温度，℃；

ΔT_{max} ——最大允许温差，取 40℃；

$\bar{k}_0$ ——修正后的 k_0 ；

α ——土类修正系数，黏性土取 0.6，粉土取 0.5。

4.2.5 三级公路（细粒土路基）不具备动三轴试验条件时，路基土回弹模量模型参数可按物性状态参数预估，预估模型见附录 C.1.2，计算时含水率与干密度的取值应涵盖本规程第 4.2.2 条规定的三种工况。

4.3 路基结构模量计算

4.3.1 路基结构模量计算应以平衡质量含水率为基本前提。

4.3.2 高速公路、一级公路、二级公路和三级公路（细粒土路基）路基结构模量按式（4-4）计算。

$$E_0 = [0.649 + 0.024(k_2 - 1.072)Hk_2] \times 1.112^{k_1} \times (0.178k_2 + 1.257) \times 1.0007^{(59.810 + k_3)k_3 - 0.093} \times [-12.837(k_1 - 8.991k_0) + 0.984] \quad (4-4)$$

式中： E_0 ——路基结构模量，MPa；

k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 ——路基土回弹模量模型参数，三级公路按 4.2.5 条预估；

H ——路面结构总厚度，m。

4.3.3 三级公路（粗粒土路基）和四级公路路基结构模量按式（4-5）计算。

$$E_0 = k_s M_{R0} \quad (4-5)$$

式中： k_s ——干路基回弹模量湿度调整系数，按现行《公路路基设计规范》（JTG D30）确定；

M_{R0} ——最佳含水率下的路基结构模量，MPa，参照附录 D.1 取值。

4.3.4 计算所得路基结构模量可取代现行《公路路基设计规范》（JTG D30）中路基设计模量 E_0 获取步骤。

4.4 模量施工分层检验标准

4.4.1 模量施工分层检验标准计算应以施工质量含水率为基本前提。

4.4.2 高速公路、一级公路、二级公路和三级公路（细粒土路基）路床顶面和路堤顶面施工分层控制模量按式（4-1）计算。计算代表应力状态： $\theta = 70$ kPa、 $\tau_{octD} = 12$ kPa、 $\tau_{octS} = 2$ kPa。计算结果适用于所有模量测试方法。

4.4.3 三级公路（粗粒土路基）和四级公路可仅对路床顶面模量进行检验，模量检验标准按式（4-6）计算。

$$E_{target} = E_{standard} / k_s \quad (4-6)$$

式中， $E_{standard}$ ——现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）或《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG D40）要求的路基设计模量，MPa；

E_{target} ——路床顶面模量检验标准，MPa；

其他符号意义同前。

4.4.4 对于各等级公路，若不满足路堤顶面模量检验标准时，应增设改善层或调整改善层厚度，改善层变更设计参照本规程 6.4 节。

5 路基变形设计

5.1 一般规定

5.1.1 路基变形设计应以变形可控为目标，建立“室内试验、结构计算、控制标准、原位检验”相衔接的变形确定与控制体系。路基变形设计包括路基土永久变形试验与预估、路基结构永久变形计算与施工分层控制变形标准。

5.1.2 路基结构变形设计应按公路等级采用。本章适用于高速公路、一级公路和二级公路填方路基结构永久变形计算、永久变形控制标准以及分层检验指标确定；对于三级公路和四级公路，可不开展路基变形设计。

5.1.3 路基结构永久变形应不大于本规程确定的永久变形控制标准；大于容许值，应采取固化、换填、提高压实度或增设改善层措施；应遵循下列原则：

1 采用固化、换填、提高压实度处理，应取处理后路基土重新开展路基湿度设计确定施工质量含水率和平衡质量含水率，并再一次进行路基变形验算；

2 采用增设改善层方式，应按本规程第 6.2 节进行改善层厚度设计。

5.1.4 本章规定的路基变形为行车荷载反复作用引起的路基非均匀永久变形，不考虑由于自重导致的路基沉降以及地基变形。地基处治与地基沉降控制应按现行《公路路基设计规范》（JTG D30）执行。

5.2 路基土永久变形试验与预估

5.2.1 对于高速公路、一级公路和二级公路，应采用室内动三轴试验确定路基土永久变形模型参数。试验设备与制样、加载及量测的基本要求应符合《公路土工试验规程》（JTG 3430）T 0194 动三轴试验的规定，加载时长、加载序列、试样准备和试验步骤具体要求见附录 C.2。

5.2.2 动三轴试验应设置下列工况：

- 1 设计状态工况（路床）：实际路床填料，路床平衡质量含水率、压实度；
- 2 设计状态工况（路堤）：实际路堤填料，路堤平衡质量含水率、压实度；
- 3 施工检验工况（路床）：实际路床填料，路床施工控制含水率、压实度；
- 4 施工检验工况（路堤）：实际路堤填料，路堤施工控制含水率、压实度。

5.2.3 试验完成后，应采用线性回归依次拟合本规程第 5.2.2 条规定工况的路基土永久变形模型参数，拟合应以应力水平、不同加载周期下永久变形计算值与实测值相一致为原则。

$$\omega = \alpha_0 N^{\alpha_1} \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{\tau_{octD}}{p_a} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{\tau_{octS}}{p_a} + 1 \right)^{\alpha_4} \quad (5-1)$$

式中： ω ——永久变形，%；

α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 ——永久变形模型参数，由试验拟合确定；

θ ——体应力，kPa，三轴试验条件下 $\theta = 3\sigma_3 + \sigma_d + \sigma_c$ ；

τ_{octD} ——动八面体剪应力，kPa，三轴试验条件下 $\tau_{octD} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$ ；

τ_{octS} ——静八面体剪应力，kPa，三轴试验条件下 $\tau_{octS} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_c$ ；

p_a ——标准大气压，kPa，取 101.3kPa；

N ——循环荷载作用次数（次）；

σ_3 、 σ_d 、 σ_c ——分别为围压、循环应力与接触应力，kPa。

5.3 路基结构永久变形计算

5.3.1 路基结构永久变形计算应以平衡质量含水率为基本前提。

5.3.2 路基结构永久变形采用分层总和法进行计算，计算点位为路床顶面。计算流程见附录 E.1.1。

5.3.3 计算时作用次数 N 应为道路设计使用年限内累计当量轴次，按现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）的有关规定确定。

5.4 路基结构永久变形控制标准

5.4.1 高速公路、一级公路和二级公路半刚性沥青路面结构，应按下列步骤确定永久变形控制标准：

1 底基层为水泥稳定碎石。应按式（5-2）计算底基层不发生疲劳开裂控制时永久变形控制标准。

2 基层为水泥稳定碎石。应按式（5-3）计算基层不发生疲劳开裂控制时永久变形控制标准。

3 有多个结果时，应取各结果中较小值。

$$[PD_{\max-\text{subb}}] = \frac{3.741 \times 10^7 \times [\sigma_{\text{subb},\max}]}{\Psi_1} - 0.6253 \quad (5-2)$$

$$[PD_{\max-\text{base}}] = \frac{3.451 \times 10^6 \times [\sigma_{\text{base},\max}]}{\Psi_2} - 0.3086 \quad (5-3)$$

式中：[PD_{max-subb}]，[PD_{max-base}]——路基顶面容许永久变形，mm；

[σ_{subb,max}]、[σ_{base,max}]——分别为底基层、基层层底容许拉应力，MPa，按附录 E.1.2 确定；

E_{pave}、E_{base}、E_{subb}——分别为面层、基层、底基层的材料模量，MPa；

H_{pave}、H_{base}、H_{subb}——分别为面层、基层、底基层的厚度，cm；

Ψ₁，Ψ₂——中间参数，按下式计算：

$$\begin{aligned} \Psi_1 = & (-0.0229E_{\text{pave}} + 0.0065) \times (-0.0209E_{\text{base}} + 0.0081) \\ & \times (0.0071E_{\text{subb}} + 0.0125) \times \exp(-0.0682H_{\text{pave}}) \\ & \times \exp(-0.0025H_{\text{base}}) \times \exp(-0.0123H_{\text{subb}}) \end{aligned} \quad (5-4)$$

$$\begin{aligned} \Psi_2 = & (-0.0425E_{\text{pave}} + 0.0025) \times (-0.0383E_{\text{base}} + 0.0045) \\ & \times (0.0117E_{\text{subb}} + 0.0148) \times H_{\text{pave}}^{-0.3872} \times H_{\text{base}}^{-0.2012} \times H_{\text{subb}}^{-0.8171} \end{aligned} \quad (5-5)$$

5.4.2 对于高速公路、一级公路和二级公路的沥青路面其他路面结构类型，路基顶面永久变形控制标准统一取 10.0 mm；对于高速公路、一级公路和二级公路的水泥混凝土路面结构，路基顶面永久变形控制标准统一取 4.0 mm。

5.5 变形施工分层检验标准

5.5.1 变形施工分层检验标准计算应以施工质量含水率为基本前提。

5.5.2 高速公路、一级公路和二级公路应对路床和路堤顶面进行变形检验。施工检验变形标准采用分层总和法计算，计算步骤同 5.3.2 条。计算点位分别为路床顶面和路堤顶面，作用次数*N*应与本规程第 8 章中变形检测周期数相同。

5.5.3 对于高速公路、一级公路和二级公路，若不满足路堤顶面变形检验标准时，应增设改善层或调整改善层厚度，改善层变更设计参照本规程 6.4 节。

6 路基改善层设计

6.1 一般规定

6.1.1 改善层为路基性能增强结构，在不满足模量和变形设计指标或路堤检验不通过时应进行设计。

6.1.2 改善层设计以确保路基在平衡湿度状态及真实服役条件下路基结构模量和结构变形均满足要求为目标，包括改善层厚度设计、改善层施工验收标准确定以及改善层厚度变更设计。

6.2 改善层厚度设计

6.2.1 改善层厚度确定应以平衡质量含水率为基本前提。

6.2.2 改善层厚度设计应根据公路等级和路面结构类型按下列规定采用：

1 高速公路、一级公路和二级公路，应进行基于变形的改善层厚度设计和基于模量的改善层厚度设计，设计厚度取两者计算结果的较大值；

2 三级公路（细粒土路基），应进行基于模量的改善层厚度设计；

3 三级公路（粗粒土路基）及四级公路应通过试验段确定改善层厚度。

6.2.3 基于模量的改善层厚度确定应按下列步骤进行：

1 获取改善层材料参数。按本规程第 4.2 节规定的方法开展施工质量含水率和目标压实度下改善层回弹模量模型试验，获得改善层回弹模量模型参数；

2 计算不同改善层厚度下的路基结构综合模量。计算流程见附录 F.1。

3 获取综合模量与改善层厚度关系，路床顶面综合模量满足现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）、《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG D40）要求的改善层厚度即为基于模量的设计厚度。

进行基于模量的改善层设计后，计算的综合模量需取代本规程 4.3.4 计算得到的路基设计模量用于路基路面结构设计。

6.2.4 基于变形的改善层厚度设计应按下列步骤进行：

1 获取改善层材料参数。按本规程第 5.2 节规定的方法开展施工质量含水率和目标压实度下改善层材料永久变形试验，获得改善层永久变形模型参数；

2 采用分层总和法计算不同改善层厚度下的路基结构永久变形。计算点位为改善层顶面，计算时作用次数 N 应为道路设计使用年限内累计当量轴次。计算流程见附录 E.1.1。

3 获取永久变形与改善层厚度关系，以满足本规程第 5.4 节永久变形要求的改善层厚度即为基于变形的设计厚度。

6.2.5 试验段确定改善层厚度应按下列步骤进行：

- 1 选取试验段，采用承载板或者 PFWD 获取路床表面模量；
- 2 铺设不同厚度的改善层，并采用承载板或者 PFWD 在改善层顶面开展模量测试，记录不同改善层厚度对应模量；
- 3 按式（4-6）计算目标模量，取满足该目标模量的最小厚度作为设计厚度。

6.2.6 改善层厚度应向上按 5 cm 进行取整，且应大于改善层公称最大粒径五倍。改善层材料应符合现行《公路路基设计规范》（JTG D30）的有关规定。

6.3 改善层施工验收标准

6.3.1 改善层施工验收标准计算应以施工质量含水率为基本前提。

6.3.2 各等级公路均需在改善层顶面进行模量验收。其中高速公路、一级公路、二级公路和三级公路（细粒土路基）验收标准计算按 6.2.3 条确定；三级公路（粗粒土路基）及四级公路检验标准按 4.4.3 条确定。

6.3.3 高速公路、一级公路和二级公路应在改善层顶面进行变形验收。按 6.2.4 条确定变形验收标准，计算点位为改善层顶面。

6.4 改善层厚度变更设计

6.4.1 改善层厚度变更设计计算应以施工质量含水率为基本前提。

6.4.2 路堤施工完模量或变形检验不通过时，应进行改善层厚度变更，应遵循下列原则：

- 1 若不满足路堤顶面模量检验标准时，应按本规程 6.2.3 条开展基于模量的改善层厚度变更设计，设计应以满足 6.3.2 改善层模量验收标准为目标。计算时应结合路堤表面模量实测值对路基结构模量进行修正。

2 若不满足路堤顶面变形检验标准时，应按本规程 6.2.4 条开展基于变形的改善层厚度变更设计，设计应以满足 6.3.3 改善层变形验收标准为目标。计算时需采用第 8 章变形反演更新路堤永久变形模型参数。

3 有多个结果时，厚度变更结果取上述计算结果的较大值，并满足 6.2.6 条厚度取值原则。

6.4.3 改善层厚度变更设计后，仍应按 6.3 节计算的改善层顶面模量和永久变形验收标准对改善层进行验收。

6.4.4 进行改善层厚度变更后，应以路基顶面标高不变为原则将路床填料部分替换为改善层填料，具体施工过程见第 7 章。

征求意见稿

7 施工

7.1 一般规定

7.1.1 湿热地区耐久性公路填方路基施工应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的规定。本章仅对湿度、模量、行车荷载永久变形和改善层的施工控制作出规定。

7.1.2 施工前应核实施工控制质量含水率范围、模量和行车荷载永久变形控制要求以及改善层施工要求。

7.1.3 正式填筑前应按现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的规定铺筑试验路段。

7.1.4 施工组织应结合降雨条件合理划分作业段，做好临时排水；已摊铺填料应及时整平、压实，降雨前不能完成压实时应采取防雨措施。

7.2 湿度施工控制

7.2.1 填料碾压时的质量含水率应处于本规程第 3 章确定的施工控制质量含水率范围内。

7.2.2 填料的含水率调整及雨期施工应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定。

7.2.3 填料碾压前应检测质量含水率，检测方法和频率应符合本规程第 8 章的规定。

7.2.4 质量含水率超出施工控制范围时，应进行调整，符合要求后方可碾压。

7.2.5 降雨后应排除积水，检查填筑层冲刷、松散、软化和泥泞情况；存在异常时，应处理并复检，符合要求后方可继续施工。

7.2.6 路基隔水、防渗、隔离及排水等构造的施工应符合现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定。

7.3 模量与变形施工控制

7.3.1 路堤顶面应进行模量和行车荷载永久变形检测，检测结果应作为改善层调整的依据。

7.3.2 路床顶面以及设置改善层时的改善层顶面，应进行模量和行车荷载永久变形检测，模量和行车荷载永久变形应分别符合本规程第 4 章和第 5 章规定的控制要求。

7.3.3 模量和行车荷载永久变形的检测方法、频率及判定应符合本规程第 8 章的规定。

7.3.4 路床顶面以及设置改善层时的改善层顶面，模量或行车荷载永久变形不满足控制要求时，应查明原因，确定处理范围，处理后应重新检测。

7.4 改善层施工控制

7.4.1 改善层施工前应核对材料、厚度等施工要求。

7.4.2 改善层的填筑、摊铺、压实等施工应根据所采用材料类型，按现行《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610）的有关规定执行。

7.4.3 改善层厚度变更时，应按本规程第 6.4 节确定的厚度和范围施工，并保持路基顶面设计标高以及变更段与相邻路段的平顺衔接。

7.4.4 改善层施工质量的检验方法、频率及判定应符合本规程第 8 章的规定。施工质量不符合要求时，应查明原因，处理后应复检。

8 质量检验与验收

8.1 一般规定

8.1.1 含水率、压实度常规施工质量指标应采用传统方法检测。检测方法应按现行《公路路基路面现场测试规程》JTG 3450 执行，检测频率和质量要求应符合现行《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610 规定。

8.1.2 路基结构模量推荐采用本规程规定的路基综合性能原位测试装备测试，也可采用现行行业标准规定的承载板、FWD、PFWD 方法测试。

8.1.3 路基永久变形应采用本规程规定的路基综合性能原位测试装备测试。

8.1.4 路基综合性能原位测试装备为编写组自行研制，包含行车动载的循环加载系统和模拟路面自重的静力约束系统。内置路基力学性质解译算法，能实现回弹模量模型参数和永久变形模型参数现场反演。

8.1.5 路基模量检验与验收规定适用于各等级公路路基；路基变形检验适用于高速公路、一级公路和二级公路。

8.2 路基结构模量测试

8.2.1 结构模量测试应在路堤顶面、路床顶面和改善层顶面开展。测试时，每 200 m 不应少于 1 个检测断面，每一断面不应少于 3 个有效测点，填料或施工工艺变化、加宽拼接、桥涵过渡、软弱区和异常区应加密检测。

8.2.2 采用承载板、FWD、PFWD 方法进行结构模量测试时，应按现行《公路路基路面现场测试规程》JTG 3450 及相应试验规程执行。

8.2.3 采用路基综合性能原位测试设备测试结构模量时，参照附录 G.1 步骤进行。

8.3 路基结构永久变形测试

8.3.1 结构变形测试应在路堤顶面、路床顶面和改善层顶面开展。测试时，每 200 m 不应少于 1 个检测断面，每一断面不应少于 3 个有效测点，填料或施工工艺变化、加宽拼接、桥涵过渡、软弱区和异常区应加密检测。

8.3.2 路堤顶面、路床顶面和改善层顶面结构永久变形测试应参照附录 G.2.1 步骤进行。

8.3.3 路堤顶面永久变形检测结果不满足检验标准时，应参照附录 G.2.2 在路堤顶面开展永久变形参数反演。

征求意见稿

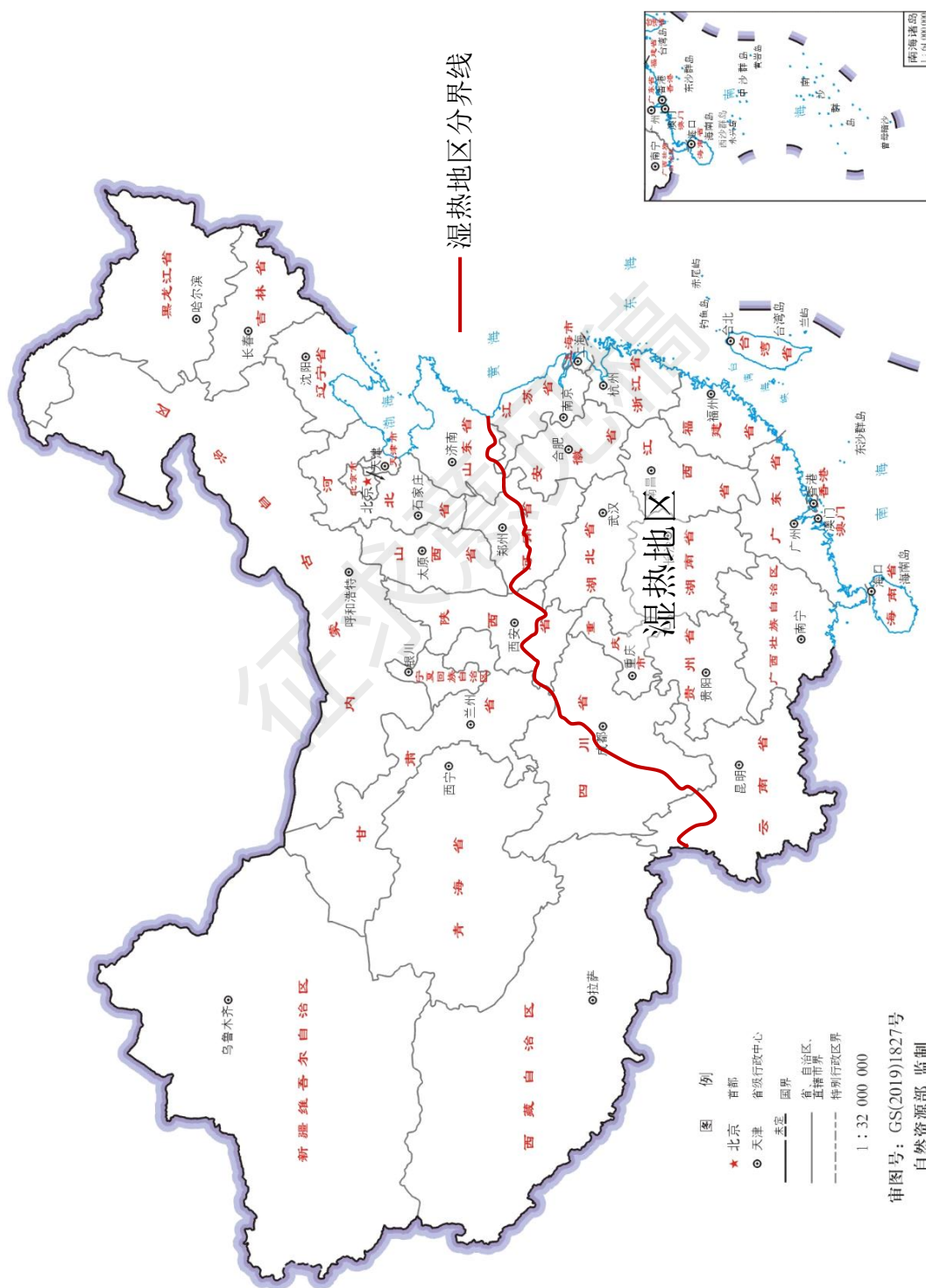
附录A 湿热地区分布

A.0.1 湿热地区按式（A-1）确定：

$$R = (T_1 > 0^{\circ}\text{C}) \cap (T_a \geq 14^{\circ}\text{C}) \cap [(K \geq 1.0) \cup (P \geq 800\text{mm})] \quad (\text{A-1})$$

式中：R——本规程湿热地区。

A.0.2 湿热地区区划图见图 A-1。



A.0.3 湿热地区主要覆盖的省级和地级行政区域可按表 A-1 确定。

表 A-1 湿热地区主要覆盖行政区域

省级行政区	覆盖范围
上海市	全域
江苏省	全域
浙江省	全域
安徽省	全域
福建省	全域
江西省	全域
山东省	枣庄市
河南省	漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市
湖北省	全域
湖南省	全域
广东省	全域
广西壮族自治区	全域
海南省	全域
重庆市	全域
四川省	成都市、自贡市、攀枝花市、泸州市、德阳市、绵阳市、广元市、遂宁市、内江市、乐山市、南充市、眉山市、宜宾市、广安市、达州市、雅安市、巴中市、资阳市、凉山彝族自治州
贵州省	全域
云南省	全域（不含迪庆藏族自治州、丽江市和怒江傈僳族自治州的北部区域）
陕西省	汉中市、安康市
台湾省	全域
香港特别行政区	全域
澳门特别行政区	全域

附录B 平衡质量含水率确定方法

B.1 平衡质量含水率理论-经验模型

B.1.1 理论-经验模型输入参数应包括地下水埋深 H_{groud} （m）、年降雨量 P （mm）、年均蒸发量 E_t （mm）、饱和体积含水率 θ_s 、残余体积含水率 θ_r 、干密度 ρ_d （g/cm³）、以及基于 VG 模型的进气值相关参数 A （kPa）和曲线形状参数 n 。

B.1.2 平衡质量含水率 w_e 应按式（B-1）计算：

$$\begin{aligned} w_e = & 2.3639 \times 10^{-3} \{-0.4125 + [(\rho_d + \theta_r)n]^{-0.4125}\} \\ & \times 0.9985^A [0.0239(0.0239 \times P + A)]^{0.2450} \\ & \times 1.1731^{0.9985(0.9233^{H_{groud}})} (E_t + 49444.762)(\theta_s + \theta_r) \end{aligned} \quad (\text{B-1})$$

B.1.3 理论-经验模型输入参数应按下列规定确定：

1 P 和 E_t 应采用工程所在地或邻近代表性气象站连续不少于 15 年的资料计算多年平均值；

2 H_{groud} 应根据工程勘察资料及历史地下水资料确定；

3 ρ_d 应按相应填筑部位的设计压实状态确定；

4 θ_s 、 θ_r 、 A 和 n 应按附录 B.2 确定。

B.2 路基填料土水特性参数确定

B.2.1 路基填料土水特征曲线宜按现行《非饱和土试验方法标准》（T/CECS 1337）规定的方法测定；需提高试验效率时，可采用本规程规定的基于轴平移技术的快速压力板仪法。

B.2.2 采用基于轴平移技术的快速压力板仪法测定路基填料土水特征曲线时，应符合下列规定：

1 本方法适用于按设计压实状态制备的路基填料土水特征曲线测试，试验最大基质吸力不应超过水气交换结构的允许工作范围。

2 仪器设备应符合下列规定：

1) 仪器应由压力室与气压施加系统、水体积量测与气泡冲刷系统以及数据采集与控制系统组成，见图 B-1。

2) 压力室与气压施加系统应包括顶盖、压力室、压力室侧壁、进气管、气压调节阀、水气交换结构、底座和固定螺栓，应符合下列规定：压力室应具有足够的刚度和气密性，其允许工作压力应满足试验最大基质吸力要求；气压调节阀应能按设定值分级施加并稳定维持气压力，升压和卸压过程应可控；水气交换结构应由亲水微孔膜与致密透水石组合构成。亲水微孔膜的实测进气值应高于试验最大基质吸力，并应具有良好的亲水性、耐压性和完整性，推荐混合纤维素酯亲水膜或聚醚砜亲水纤维膜；致密透水石应表面平整、透水均匀，并应对亲水微孔膜形成连续稳定支撑；水气交换结构、试样及底座之间应紧密接触，密封装置在试验压力范围内不得发生明显漏气。

3) 水体积量测与气泡冲刷系统应包括储水室、水循环管、组合管、水位计和蠕动泵，并与压力室底座连通；水位计和组合管应能连续量测试样排水量或水体积变化，蠕动泵应能驱动水体循环以清除管路及水气交换结构下部聚集的气泡。管路应便于充水、排气和检查，系统内不应残留影响量测的气泡。

4) 数据采集与控制系统，应由工业电脑及相应的数据采集与控制装置组成，应能控制气压调节阀和蠕动泵运行，采集气压力和水位变化，实现基质吸力逐级加载、水体积自动量测、气泡自动冲刷和试验数据记录。

3 试样制备与安装应符合下列规定：

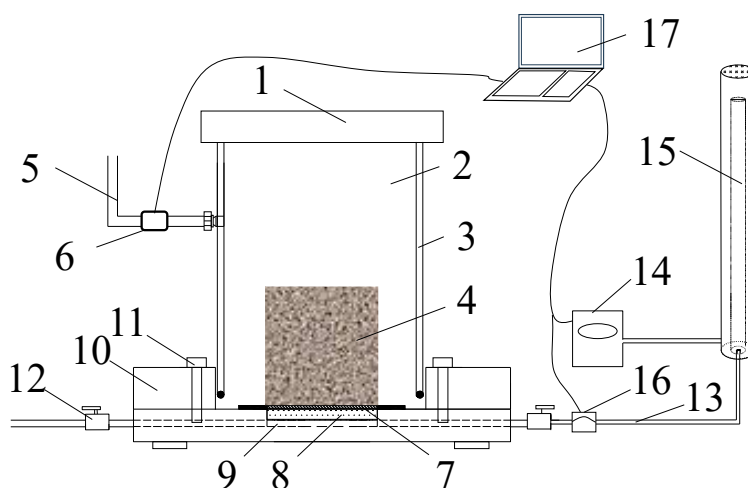
1) 试样应按相应填筑部位的设计干密度制备，制样质量含水率宜采用最佳质量含水率；试样宜采用静压法或分层击实法成型。

2) 试样采用直径、高度及最大粒径应与压力室和试样筒相适应，推荐直径 61.8mm 和高度 20mm 的环刀制样。

3) 试样、亲水微孔膜、致密透水石及其连通水路应充分饱和。试样饱和方法应符合现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）的有关规定。

4) 安装时，应将饱和的水气交换结构平整置于底座上，使其与试样底面紧密接触；安装后，微孔膜与透水石、试样底面应紧密贴合，不得有褶皱、破损和可见气泡，安装密封圈、试样筒和顶盖后，应检查压力室的密封性。

5) 应向排水与水体积量测系统充入无气水并排除气泡。



注：1 压力室顶盖；2 压力室；3 压力室侧壁；4 土样；5 进气管；6 气压调节阀；7 亲水微孔膜；8 致密透水石；9 储水室；10 底座；11 固定螺栓；12 水阀；13 水循环管；14 水位计；15 组合管；16 蠕动泵；17 工业电脑。

图 B-1 基于轴平移技术的快速压力板仪

4 试验步骤应符合下列规定：

- 1) 安装完成后，应记录试样编号、土样类别、制样质量含水率、干密度、试样尺寸、亲水微孔膜型号及进气值等初始资料。
- 2) 应根据预期土水特征曲线范围、填料类型和设备量程确定各级基质吸力值及其增量。试验最大基质吸力应低于水气交换结构的实测进气值，并宜留有安全余量。
- 3) 应按由低至高的顺序分级施加气压力。
- 4) 每级基质吸力施加后，应保持排水通路连通，并连续或定时记录气压力、时间、累计排水量或水体积变化，试验记录宜按表 B-1 填写。
- 5) 在同一级吸力下，应保持气压力稳定、排水通路连通和水循环管路无可见气泡。在本规程推荐的试样尺寸下，排水量变化不大于 0.006mL/h 时，可判定达到水分平衡；采用其他试样尺寸或量测系统时，应通过对比试验确定相应的平衡判据。
- 6) 各级基质吸力达到水分平衡后方可进入下一级。达到预定最大基质吸力并完成平衡观测后，应缓慢卸除压力，拆除试样，测定试样终态质量含水率，并检查水气交换结构和管路状况。

表 B-1 快速压力板仪试验记录表

工程名称 _____ 试验日期 _____
 试验者 _____ 计算者 _____ 校核者 _____

级次	气压力 (kPa)	基质吸力 (kPa)	平衡时间 (h)	累计排水量 (mL)	排水量变化 速率(mL/h)	质量含水率 (%)	备注
1							
2							
3							
4							
5							
.....							

注：标准大气压下，施加的气压力和基质吸力数值相等。

5 试验结果整理与质量控制应符合下列规定：

1) 应根据试样初始质量、干土质量和各级平衡后经气泡冲刷和蒸发影响修正的累计排水量，计算各级基质吸力对应的质量含水率；体积含水率宜按试样初始体积换算。试验报告应同时记录亲水微孔膜孔径和实测进气值、致密透水石状态、吸力路径及水分平衡判据。

2) 应绘制基质吸力与质量含水率或体积含水率关系曲线。

3) 试验过程中发生压力不能稳定、压力室或管路漏气、量测系统进气、水气交换结构破损或超过进气值、排水数据明显异常等情况时，应查明原因；经处置后仍不能满足要求的，应重新试验。

4) 同一填料需用于设计参数确定时，宜进行平行试验；当试验结果离散明显时，应复核试样制备、饱和、密封、判稳和数据处理过程。

B.2.3 土水特征曲线应采用 Van Genuchten 模型进行拟合：

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (s/A)^n]^{-m} \quad (\text{B-2})$$

式中： θ ——体积含水率；

θ_r ——残余体积含水率；

θ_s ——饱和体积含水率；

s ——基质吸力，kPa；

A ——进气值相关参数，kPa；

n 、 m ——曲线形状参数， $m = 1 - 1/n$ 。

B.2.4 饱和体积含水率 θ_s 可采用饱和试样称重法或计算法确定，并应符合下列规定：

1 采用饱和试样称重法时，试样应按设计压实状态制备，试件饱和方法应符合现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）的有关规定。饱和后应称量试样质量，并按下式计算饱和体积含水率：

$$\theta_s = \frac{m_{sat} - m_d}{\rho_w V} \quad (\text{B-3})$$

式中： m_{sat} ——饱和试样质量，g；

m_d ——试样干土质量，g；

ρ_w ——水的密度，取 1.0 g/cm³；

V ——试样体积，cm³。

2 采用计算法时，应根据路基填料土粒比重和设计状态干密度按下式计算：

$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w} \quad (\text{B-4})$$

式中： G_s ——土粒比重；

ρ_d ——设计状态干密度，g/cm³。

土粒比重和最大干密度的试验应符合现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）的有关规定。

B.2.5 无可靠土水特征曲线试验资料时，填料进气值相关参数 A ，曲线形状参数 n ，和残余体积含水率 θ_r 可按表 B-2 取值。

表 B-2 土水特征曲线参数推荐值

填料类型	A (kPa)	n	θ_r
砂类土	2~10	4.0~8.5	$0.05\theta_s \sim 0.10\theta_s$
粉土	10~100	2.0~4.0	$0.08\theta_s \sim 0.15\theta_s$
黏土	100~1000	1.1~2.5	$0.10\theta_s \sim 0.20\theta_s$

注：1 细粒含量系指粒径小于 0.075 mm 的颗粒质量占土样总质量的百分比。

2 表中参数应结合填料颗粒组成和塑性特征在推荐范围内选取。同一类土，细粒含量较高或塑性较强时， A 和 θ_r 宜取较大值， n 宜取较小值；细粒含量较低或塑性较弱时，宜反向取值。

附录C 路基土动力性能试验方法

C.1 路基土回弹模量试验

C.1.1 路基土回弹模量试验采用考虑静偏应力水平的加载方式。与现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）T 0194 试验相比，本规程不同要求如下：

1 加载时长。高液限土应取 0.4s，其余路基土应取 0.2s，间歇时长统一取 0.9s；

2 加载序列。应考虑静偏应力水平的回弹模量 28 序列，如表 C-1 所示。其中序列 0 为预加载，序列 1~序列 28 为正式加载。

表 C-1 考虑静偏应力水平的回弹模量试验加载序列

序列	围压 σ_3 (kPa)	循环应力 σ_d (kPa)	接触应力 σ_c (kPa)	σ_c/σ_d	循环次数
0	60.0	35.0	40.0	1.14	1000
1	20.0	15.0	10.0	0.67	100
2	40.0	15.0	10.0	0.67	100
3	60.0	15.0	10.0	0.67	100
4	80.0	15.0	10.0	0.67	100
5	20.0	15.0	25.0	1.67	100
6	40.0	15.0	25.0	1.67	100
7	60.0	15.0	25.0	1.67	100
8	80.0	15.0	25.0	1.67	100
9	20.0	15.0	40.0	2.67	100
10	40.0	15.0	40.0	2.67	100
11	60.0	15.0	40.0	2.67	100
12	80.0	15.0	40.0	2.67	100
13	20.0	15.0	55.0	3.67	100
14	40.0	15.0	55.0	3.67	100
15	60.0	15.0	55.0	3.67	100
16	80.0	15.0	55.0	3.67	100
17	20.0	35.0	40.0	1.14	100
18	40.0	35.0	40.0	1.14	100
19	60.0	35.0	40.0	1.14	100
20	80.0	35.0	40.0	1.14	100
21	20.0	55.0	25.0	0.45	100
22	40.0	55.0	25.0	0.45	100
23	60.0	55.0	25.0	0.45	100
24	80.0	55.0	25.0	0.45	100
25	20.0	75.0	10.0	0.13	100
26	40.0	75.0	10.0	0.13	100
27	60.0	75.0	10.0	0.13	100
28	80.0	75.0	10.0	0.13	100

3 试验数据记录表见表 C-2。宜按土类、含水率、压实度分类归档。平行试样回弹模量偏差大于 15%的数据应剔除并说明原因。试验报告应包括下列内容：

- 1) 土样基本类型；
- 2) 制样参数（含水率、压实度、高度、直径）；
- 3) 回弹变形记录与回弹模量计算结果；
- 4) 模型参数拟合结果及拟合优度。

表 C-2 路基回弹模量试验记录表

工程名称	土 类					试验日期				
试验含水率	试验干密度					试验温度				
制样高度	制样直径									
试 验 者	计 算 者					校 核 者				

序 列	最后五周期回弹弯沉（0.01mm）					平均回弹弯沉 （0.01mm）	围压 （kPa）	接触应力 （kPa）	循环应力 （kPa）	回弹模量 （MPa）
	96	97	98	99	100					
1										
2										
3										
4										
5										
.....										

C.1.2 路基土回弹模量预估模型参数和土性参数、应力水平、湿度状态、压实程度均具有显著的相关关系，结合大量试验数据基础上可构建基于物性状态的回弹模量预估模型参数预估模型。本规程针对细粒土构建了预估工程，见式（C-1）~式（C-4）。在数据量足够多的前提下，也可基于物性状态参数拟合更具针对性的回弹模量模型经验预估公式。

$$k_0 = 1.255 - 0.095\omega + 0.232\rho_d + 0.012I_p + 0.0100P_{0.075} \quad (\text{C-1})$$

$$k_1 = 0.956 - 0.010\omega - 0.152\rho_d - 0.008I_p - 0.0023P_{0.075} \quad (\text{C-2})$$

$$k_2 = 6.518 - 0.196\omega - 2.700\rho_d - 0.030I_p - 0.0003P_{0.075} \quad (\text{C-3})$$

$$k_3 = Q \cdot \exp(0.00434\omega + 0.06258\rho_d - 0.00153I_p - 0.00083P_{0.075}) \quad (\text{C-4})$$

式中： ω ——含水率，%；

ρ_d ——干密度，g/cm³；

I_p ——塑性指数，%；

$P_{0.075}$ ——细粒含量，%；

Q——为中间参数，按下式计算：

$$Q = -0.13677 + 0.03416\omega + 0.75295\rho_d - 0.00585I_p - 0.00414P_{0.075} \\ + 0.00010\omega\rho_d + 0.00006\omega I_p + 0.00002\omega P_{0.075} \\ + 0.00141\rho_d I_p + 0.00053\rho_d P_{0.075} \quad (\text{C-5})$$

C.2 路基土永久变形试验

C.2.1 路基土永久变形试验采用考虑静偏应力水平的加载方式。与现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）T 0194 试验相比，本规程不同要求如下：

- 1 加载时长。高液限土应取 0.4s，其余路基土应取 0.2s，间歇时长统一取 0.9s；
- 2 加载序列。应采用考虑静偏应力水平的永久变形 6 级加载序列，按表 C-3 执行。高速公路、一级公路、二级公路应开展全部 6 个应力状态的试验。
- 3 试样准备。每一序列应采用重新制作的试样单独进行试验；
- 4 试验步骤。首先只施加围压和接触应力静压，直至连续 30min 内应变小于 0.1%时结束静载；静载结束后记录静载变形并清零，在此基础上叠加循环加载，记录每一加载周期结束后的永久变形。

表 C-3 考虑静偏应力水平的永久变形试验加载序列

应力状态	围压 σ_3 (kPa)	循环应力 σ_d (kPa)	接触应力 σ_c (kPa)	σ_c/σ_d	循环次数 (次)
1	20.0	15.0	55.0	2.75	10000
2	80.0	15.0	55.0	0.69	10000
3	20.0	35.0	40.0	2.00	10000
4	80.0	35.0	40.0	0.50	10000
5	20.0	55.0	25.0	1.60	10000
6	80.0	55.0	25.0	0.40	10000

5 试验数据记录表见表 C-4。宜按土类、含水率、压实度分类归档。平行试样永久变形偏差大于 15%的数据应剔除并说明原因。试验报告应包括下列内容：

- 1) 土样基本性质；
- 2) 制样参数（含水率、压实度、试验温度）；
- 3) 静载阶段竖向变形量；
- 4) 加载序列、加载时长及各加载周期永久变形记录
- 5) 模型参数拟合结果及拟合优度。

表 C-4 路基永久变形试验记录表

工程名称	_____	土 类	_____	试验日期	_____
试验含水率	_____	试验干密度	_____	试验温度	_____
围压	_____	接触应力	_____	循环应力	_____
制样高度	_____	制样直径	_____	静压变形	_____
试 验 者	_____	计 算 者	_____	校 核 者	_____

加载次数	永久变形 (0.01mm)	永久应变 (%)	加载次数	永久变形 (0.01mm)	永久应变 (%)
10			7000		
20			7500		
30			8000		
40			8500		
50			9000		
.....					

附录D 路基结构模量取值表及模量设计示例

D.1 路基结构模量取值范围

D.1.1 表 D-1 来源于编写组针对 14 种路基土开展的回弹模量试验结果，试验条件为 96%压实度和最佳含水率。结构模量按关键响应等效原则、分不同道路等级计算获得，计算时考虑了路面结构约束与行车动荷载的综合作用。

表 D-1 最佳含水率下路基结构模量推荐值 (MPa)

路基土土组	高速公路	一级、二级公路	三级、四级公路
砾	155~165	152~163	150~160
含细粒土砾	152~162	149~160	147~157
粉土质砾	143~158	140~157	138~154
黏土质砾	140~155	137~153	136~151
砂	141~154	139~152	137~149
含细粒土砂	139~151	136~149	134~146
粉土质砂	130~148	128~146	126~143
黏土质砂	128~145	125~143	124~140
含砾低液限粉土	139~148	136~146	134~144
含砂低液限粉土	126~138	124~136	122~133
低液限粉土	115~125	113~124	112~130
含砾低液限黏土	136~145	133~143	132~141
含砂低液限黏土	124~135	121~133	120~130
低液限黏土	113~123	111~121	109~127

注：1 对砾和砂， D_{60} （通过率为 60%的颗粒粒径）大时取高值，反之取低值；

2 对其他含细粒土的土组，小于 0.075mm 颗粒含量大时取低值，反之取高值。

D.2 路基结构模量计算示例

D.2.1 高速公路路基结构模量确定示例（土性：粘土，地点：湖南长沙）

1 参照现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）土工基本性能试验，结果如表 D-2 所示，定义土壤类型为含砂低液限粘土，路堤和路床填筑均采用该土进行填筑。

表 D-2 基本土性参数

比重	液限	塑性指数	最佳含水率	最大干密度	0.075mm 通过率
2.717	40.3%	17.1%	13.05%	1.864t/m ³	70.78%

2 结合第 3 章中施工质量含水率和平衡质量含水率确定方法，确定该土合适的施工质量含水率为 15.66%，平衡质量含水率为 21.45%。

3 按照 4.2.1 条要求，依次按下列工况进行三轴试件制样：

1) 压实度：96.0%，含水率：21.45%（路床填料，设计含水率）；

2) 压实度：96.0%，含水率：15.66%（路床填料，施工质量含水率）；

3) 压实度：94.0%，含水率：15.66%（路堤填料，施工质量含水率）；

4 依次完成 28 个应力状态加载，并记录每一个加载序列下的回弹模量，并采用非线性最小二乘（回归）拟合回弹模量模型参数：

表 D-3 回弹模量参数拟合表

工况	k_0	k_1	k_2	k_3	相关系数
①	0.49	0.07	-0.64	2.79	0.97
②	0.77	0.10	-0.60	2.40	0.92
③	0.70	0.11	-0.75	1.51	0.96

5 进行温度修正，由于试验温度为 25℃，长沙近 10 年最高温度为 40.8℃，按 4.2.4 条对拟合结果 k_0 进行修正，确定结构模量计算时温度修正系数为 0.91，施工检验标准计算时温度修正系数为 1.00；获得修正后的回弹模量参数拟合表：

表 D-4 温度修正回弹模量参数拟合表

工况	温度修正	k_0	k_1	k_2	k_3	相关系数
①	0.45	0.45	0.07	-0.64	2.79	0.97
②	1.00	0.77	0.10	-0.60	2.40	0.92
③	1.00	0.70	0.11	-0.75	1.51	0.96

6 假定路面结构总厚度为 76cm，累计轴载作用次数 48×10^6 ，特重交通，基于表 D-4 工况①计算路基结构模量：

$$[0.649 + 0.024 \times (0.64 + 1.072) \times 0.76 \times 0.64] \times 1.112^{0.07} \times (-0.178 \times 0.64 + 1.257) \times 1.0007^{(59.810+2.79) \times 2.79 - 0.093} \times [-12.837 \times (0.07 - 8.991 \times 0.45) + 0.984] = 45.29 \text{ MPa}$$

7 结构校验。路基结构模量为 45.29MPa，不满足现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）中特重交通 60MPa 的路基模量要求，应采取增设改善层、固化处理或提高压实度等措施。若采用固化处理或提高压实度等措施，需重新进行湿度设计，开展回弹模量试验，并再次进行模量验算。本规程不对路基土进行改良和固化处理，采用增设改善层的方式，具体示例参照附录 F。

D.3 模量分层检验标准计算示例

D.3.1 高速公路路基分层控制模量确定示例（土性：粘土，地点：湖南长沙）

1 基于表 D-4 工况②，工况③回弹模量参数，结合 4.4.2 条分别计算路床顶面和路堤顶面施工检验模量：

$$\text{工况②: } 0.77 \times 101 \times \left(\frac{70}{101}\right)^{0.10} \left(\frac{12}{101} + 1\right)^{-0.60} \left(\frac{2}{101} + 1\right)^{2.40} = 73.46 \text{ MPa}$$

$$\text{工况③: } 0.70 \times 101 \times \left(\frac{70}{101}\right)^{0.11} \left(\frac{12}{101} + 1\right)^{-0.75} \left(\frac{2}{101} + 1\right)^{1.51} = 64.30 \text{ MPa}$$

2 因此，采用含砂低液限粘土进行路基填筑时，要求：

路堤顶面模量控制标准为 64.30 MPa；

路床顶面模量控制标准为 73.46 MPa。

附录E 路基结构变形计算流程及变形设计示例

E.1 路基结构变形计算流程

E.1.1 路基结构变形按分层总和法进行计算，应遵循下列步骤：

1 划分亚层。如计算点位位于改善层顶面时，改善层分层厚度统一取 5cm，路床亚层划分应按表 E-1 执行，路堤部分分层厚度统一取 20cm；如计算点位位于路床顶面时，路基永久变形计算路床亚层划分应按表 E-1 执行，路堤部分分层厚度统一取 20cm；如计算点位位于路堤顶面时，路堤部分分层厚度按表 E-2 执行。

表 E-1 路床亚层厚度划分

路床厚度	亚层厚度 (cm)
0.0m~0.2m	5
0.2m~0.8m	10
0.8m 以上	20

表 E-2 路堤亚层厚度划分

路堤厚度	亚层厚度 (cm)
0.0m~1.0m	10
1.0m 以上	20

2 分情况计算各亚层代表应力水平。

1) 对于路基结构永久变形计算及改善层厚度设计，采用移动荷载作用下的受力模式，按式 (E-1) ~ 式 (E-3) 计算各亚层代表围压、循环应力与接触应力。

$$\sigma_3 = K_0(\sigma_G + \sigma_0) + \sigma_{D3} \quad (\text{E-1})$$

$$\sigma_d = \sigma_{D1} \quad (\text{E-2})$$

$$\sigma_c = (1 - K_0)(\sigma_G + \sigma_0) \quad (\text{E-3})$$

式中： σ_3 、 σ_d 、 σ_c ——分别为围压、循环应力与接触应力，kPa；

K_0 ——静止土压力系数，可按 $K_0 = \mu/(1 - \mu)$ 进行估算， μ 为泊松比；

σ_G ——代表点至计算点位间累计竖向自重应力；

σ_0 ——计算点位以上结构自重引起的附加应力，kPa；

H ——路面结构总厚度，m；

σ_{D1} 、 σ_{D3} ——分别为行车荷载引起的竖向应力与水平动应力，kPa，计算如下：

$$\sigma_{D1} = 7.488 \times H^{-1.687} (1+z)^{-1.001} V^{-0.063} \quad (\text{E-4})$$

$$\sigma_{D3} = 2.026 \times H^{-1.499} (1+z)^{-1.820} V^{-0.039} \quad (\text{E-5})$$

式中， V ——行车速度，km/h；

z ——代表点距路计算点位的垂直距离，m；

2) 对于路堤顶面、路床顶面及改善层顶面变形验收标准，以及基于变形的改善层厚度变更设计，采用第 8 章路基综合性能原位测试装备的受力模式，按式（E-6）～式（E-8）计算各亚层中心处的代表围压、循环应力与接触应力。

$$\sigma_3 = K_0(\sigma_G + \sigma_{SR} + \sigma_{DR}) \quad (\text{E-6})$$

$$\sigma_d = (1 - K_0)\sigma_{DR} \quad (\text{E-7})$$

$$\sigma_c = (1 - K_0)(\sigma_G + \sigma_{SR}) \quad (\text{E-8})$$

式中： σ_{DR} ， σ_{SR} ——内环动载和外环静载作用下沿深度方向应力分布，按实际测试应力状态确定。变形验算采用第 8 章路基综合性能原位测试装备进行测试，因此采用弹性半空间圆形均布荷载下的应力分布解析解，按下式计算：

$$\sigma_{DR} = \sigma_{dynamic} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{a_1}{z} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} \quad (\text{E-9})$$

$$\sigma_{SR} = \sigma_{static} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{a_2}{z} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} \quad (\text{E-10})$$

式中， $\sigma_{dynamic}$ 、 σ_{static} ——分别为本规程第 8 章施加动载与静载应力，kPa，取值应与设备测试时所施加应力水平保持一致。

a_1 ——内环荷载半径，m，取第 8 章原位测试设备内环半径，0.10m；

a_2 ——外环荷载半径，m，取第 8 章原位测试设备外环半径，0.20m；

其余符号意义同前。

3 带入各亚层对应工况下变形模型参数、作用次数 N 、及代表应力状态，按式（5-1）分别计算各亚层永久变形，累加获得路基结构永久变形。

E.1.2 无机结合料稳定层层底容许拉应力应考虑材料的实际服役状态、累计作用次数和气候分区，确定时较为繁琐。考虑到设计可行性，本规程基于《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）中无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命方程通过转换后获得，如式（E-11）所示。

$$[\sigma_{t,max}] = \frac{R_s}{b} \left[a + c_1 e^{c_2(h_a+h_b)} + c_3 - 0.57\beta - \lg \left(\frac{N_{f2} k_{T2}}{k_a} \right) \right] \quad (\text{E-11})$$

式中： N_{f2} ——无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命（轴次）；

k_a ——季节性冻土地区调整系数，按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）确定；

k_{T2} ——温度调整系数，按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）确定；

R_s ——无机结合料稳定类材料的弯拉强度（MPa），按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）确定；

a 、 b ——回归参数，按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）确定；

c_1 、 c_2 、 c_3 ——参数，按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）确定；

h_a 、 h_b ——为沥青混合料层和计算点以上无机结合料稳定层的厚度（m）；

β ——目标可靠指标，按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）确定。

E.2 高速公路路基结构变形确定示例

E.2.1 以湖南长沙粘土为例计算结构永久变形

1 这里采用的路基土与表 D-2 相同，路面结构为 76cm。按照 5.2.2 条要求，依次按下列工况进行三轴试件制样：

- 1) 压实度：96.0%，含水率：21.45%（路床填料，设计含水率）；
- 2) 压实度：93.5%，含水率：21.45%（路堤填料，设计含水率）；
- 3) 压实度：96.0%，含水率：15.66%（路床填料，施工质量含水率）；
- 4) 压实度：93.5%，含水率：15.66%（路堤填料，施工质量含水率）；

2 依次完成 6 个应力状态加载，并记录每一个加载序列下的永久变形曲线，并基于式（5-1）拟合模型参数，结果如下：

表 E-3 永久变形参数拟合表

工况	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	相关系数
①	5.84	0.09	-0.42	1.21	-4.57	0.95
②	9.87	0.1	-0.37	1.18	-3.42	0.93
③	1.43	0.07	-0.48	1.03	-3.36	0.94
④	2.34	0.08	-0.32	0.91	-3.76	0.91

3 路面结构总厚度为 76cm，特重交通，路床厚度 80cm，累计轴载次数为 48×10^6 ，取工况①和工况②参数按计算路基结构变形，带入设计含水率后，可得路床土湿密度为 2.17 t/m^3 ，路堤土湿密度为 2.12 t/m^3 ，计算时取 $K_0 = 0.53$ ，路面自重 $\sigma_0 = 15.6 \text{ kPa}$ ，路床厚度取 80cm，路堤厚度取 300cm。变形计算表如

表 E-4 所示。可得路床总变形为 3.39mm，路堤总变形为 7.10mm，设计结构变形为 10.49mm。

表 E-4 路基永久变形计算表

亚层	层位	厚度 (cm)	代表深度 (m)	竖向动载 (kPa)	水平动载 (kPa)	应变 (%)	变形 (mm)
1	路床	5	0.025	8.20	2.33	0.68	0.34
2		5	0.075	7.82	2.14	0.63	0.32
3		5	0.125	7.47	1.97	0.59	0.29
4		5	0.175	7.15	1.82	0.54	0.27
5		10	0.250	6.72	1.63	0.49	0.49
6		10	0.350	6.22	1.41	0.43	0.43
7		10	0.450	5.79	1.24	0.37	0.37
8		10	0.550	5.42	1.10	0.33	0.33
9		10	0.650	5.09	0.98	0.29	0.29
10		10	0.750	4.80	0.88	0.26	0.26
11	路堤	20	0.900	4.42	0.76	0.55	1.10
12		20	1.100	4.00	0.63	0.46	0.92
13		20	1.300	3.65	0.54	0.39	0.77
14		20	1.500	3.36	0.46	0.33	0.66
15		20	1.700	3.11	0.40	0.28	0.57
16		20	1.900	2.89	0.35	0.25	0.50
17		20	2.100	2.71	0.31	0.22	0.43
18		20	2.300	2.54	0.28	0.19	0.38
19		20	2.500	2.40	0.25	0.17	0.34
20		20	2.700	2.27	0.23	0.15	0.30
21		20	2.900	2.15	0.20	0.14	0.27
22		20	3.100	2.05	0.19	0.12	0.25
23		20	3.300	1.95	0.17	0.11	0.22
24		20	3.500	1.86	0.16	0.10	0.20
25		20	3.700	1.79	0.15	0.09	0.18

E.3 高速公路路基结构变形控制标准确定示例

E.3.1 以湖南长沙粘土为例确定变形控制标准

1 确定路面结构各结构层厚度及模量，如表E-5所示。

表 E-5 路面结构层参数取值表

层位	材料类型	厚度 (cm)	模量 (MPa)
面层	沥青混合料	18	7000
基层	水泥稳定碎石	38	10000
底基层	水泥稳定碎石	20	8000

2 按式 (E-11) 计算基层和底基层层底疲劳应力。参照《公路沥青路面设计规范 (JTG D50)》确定各参数取值。对于 R_s ，基层材料的取1.5MPa、底基层

材料的弯拉强度取0.9MPa；对于 a 与 b ，分别取 $a = 13.24$ 、 $b = 12.52$ ；对于 c_1 、 c_2 、 c_3 ，取 $c_1 = 0.40$ 、 $c_2 = -0.0076$ 、 $c_3 = -1.47$ ；对于 h_a ，取 $h_a = 180\text{mm}$ ；对于 h_b ，基层取 $h_b = 380\text{mm}$ ，底基层取 $h_b = 580\text{mm}$ 。对于 β ，取 $\beta = 1.65$ 。 N_{f2} ，取 $N_{f2} = 48 \times 10^6$ 次。对于 k_a ，湖南省为轻冻区，取 $k_a = 0.90$ ；对于 k_{T2} ，取 $k_{T2} = 1.42$ 。将以上参数代入式（E-11），求得 $[\sigma_{base,max}]$ 、 $[\sigma_{subb,max}]$ 分别为0.354MPa、0.212MPa。

$$[\sigma_{base,max}] = \frac{1.5}{12.52} \times \left[\frac{13.24 + 0.4 \times e^{-0.0076(180+380)} - 1.47}{0.57 \times 1.65 - \lg\left(\frac{48 \times 10^6 \times 1.42}{0.90}\right)} - \right] = 0.354 \text{ MPa}$$

$$[\sigma_{subb,max}] = \frac{0.9}{12.52} \times \left[\frac{13.24 + 0.4 \times e^{-0.0076(180+580)} - 1.47}{0.57 \times 1.65 - \lg\left(\frac{48 \times 10^6 \times 1.42}{0.90}\right)} - \right] = 0.212 \text{ MPa}$$

3 按照5.4.1条确定保证基层不发生疲劳开裂的路基永久变形最大值容许上限为 $[PD_{max}] = 8.12 \text{ mm}$ 。

$$\begin{aligned} \Psi_2 &= (-0.0425 \times 7000 + 0.0025)(-0.0383 \times 10000 + 0.0045) \\ &\times (0.0117 \times 8000 + 0.0148) \times 18^{-0.3872} \times 38^{-0.2012} \times 20^{-0.8171} = 1.45 \times 10^5 \\ [PD_{max}] &= \frac{3.451 \times 10^6 \times 0.354}{1.45 \times 10^5} - 0.3086 = 8.12 \text{ mm} \end{aligned}$$

4 按照5.4.1条计算保证底基层不发生疲劳开裂的路基永久变形最大值容许上限为 $[PD_{max}] = 19.41 \text{ mm}$ 。

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= (-0.0229 \times 7000 + 0.0065)(-0.0209 \times 10000 + 0.0081) \\ &\times (0.0071 \times 8000 + 0.0125) \times \exp(-0.0682 \times 18) \\ &\times \exp(-0.0025 \times 38) \exp(-0.0123 \times 20) = 3.96 \times 10^5 \\ [PD_{max}] &= \frac{3.741 \times 10^7 \times 0.212}{3.96 \times 10^5} - 0.62528 = 19.41 \text{ mm} \end{aligned}$$

5 确定基于路面结构服役性能的路基永久变形控制标准，基于路面结构服役性能的路基永久变形控制标准 $[PD_{max}]$ 为 $\min(19.41\text{mm}, 8.12\text{mm}) = 8.12\text{mm}$

6 路基变形设计校核，由于设计含水率下路基顶面计算结构变形为10.49mm，大于控制标准8.12 mm，不满足路基变形要求，应采取增设改善层、固化处理或提高压实度等措施。若采用固化处理或提高压实度等措施，需重新

进行湿度设计，开展永久变形试验，并再次验算路基顶面变形。本规程不对路基土进行改良和固化处理，采用增设改善层的方式，具体示例参照附录 F。

E.4 高速公路路基施工变形检验标准确定示例

E.4.1 路堤顶面变形检验标准计算。带入表 E-3 工况④所示的施工质量含水率下测试参数，按 5.5.2 条计算方法计算路堤检验变形标准。测试应力水平 $\sigma_{dynamic} = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 25\text{kPa}$ ，作用次数为 10000 次。计算路堤厚度 3.0m，计算表格见表 E-6，可得施工期路堤顶面变形检验标准为 4.08mm。

表 E-6 路堤顶面变形检验标准计算表

亚层	层位	厚度 (cm)	代表深度 (m)	竖向动载 (kPa)	水平动载 (kPa)	应变 (%)	变形 (mm)
1	路堤	10	0.05	91.06	48.26	1.30	1.30
2		10	0.15	42.40	22.47	0.81	0.81
3		10	0.25	19.96	10.58	0.51	0.51
4		10	0.35	11.10	5.89	0.34	0.34
5		10	0.45	6.98	3.70	0.24	0.24
6		10	0.55	4.76	2.52	0.18	0.18
7		10	0.65	3.45	1.83	0.13	0.13
8		10	0.75	2.61	1.38	0.10	0.10
9		10	0.85	2.04	1.08	0.08	0.08
10		10	0.95	1.64	0.87	0.06	0.06
11		20	1.10	1.23	0.65	0.05	0.09
12		20	1.30	0.88	0.47	0.03	0.06
13		20	1.50	0.66	0.35	0.02	0.05
14		20	1.70	0.52	0.27	0.02	0.03
15		20	1.90	0.41	0.22	0.01	0.03
16		20	2.10	0.34	0.18	0.01	0.02
17		20	2.30	0.28	0.15	0.01	0.02
18		20	2.50	0.24	0.13	0.01	0.01
19		20	2.70	0.21	0.11	0.01	0.01
20		20	2.90	0.18	0.09	0.00	0.01

E.4.2 路床顶面变形检验标准计算。带入表 E-3 工况③和工况④所示的施工质量含水率下路床和路堤测试参数，按 5.5.2 条计算方法计算路床检验变形标准。测试应力水平 $\sigma_{dynamic} = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 25\text{kPa}$ ，作用次数为 10000 次。计算路堤厚度 3.0m，路床厚度 0.8m。计算表格见表 E-7，可得施工期路床顶面变形检验标准为 2.02mm。

表 E-7 路床顶面变形检验标准计算表

亚层	层位	厚度 (cm)	代表深度 (m)	竖向动载 (kPa)	水平动载 (kPa)	应变 (%)	变形 (mm)
1	路床	5	0.025	98.57	52.24	0.60	0.30
2		5	0.075	78.40	41.55	0.52	0.26
3		5	0.125	52.39	27.76	0.40	0.20
4		5	0.175	34.55	18.31	0.31	0.16
5		10	0.250	19.96	10.58	0.22	0.22
6		10	0.350	11.10	5.89	0.15	0.15
7		10	0.450	6.98	3.70	0.10	0.10
8		10	0.550	4.76	2.52	0.07	0.07
9		10	0.650	3.45	1.83	0.05	0.05
10		10	0.750	2.61	1.38	0.04	0.04
11	路堤	20	0.900	1.82	0.97	0.07	0.14
12		20	1.100	1.23	0.65	0.04	0.09
13		20	1.300	0.88	0.47	0.03	0.06
14		20	1.500	0.66	0.35	0.02	0.04
15		20	1.700	0.52	0.27	0.02	0.03
16		20	1.900	0.41	0.22	0.01	0.03
17		20	2.100	0.34	0.18	0.01	0.02
18		20	2.300	0.28	0.15	0.01	0.02
19		20	2.500	0.24	0.13	0.01	0.01
20		20	2.700	0.21	0.11	0.01	0.01
21		20	2.900	0.18	0.09	0.00	0.01
22		20	3.100	0.16	0.08	0.00	0.01
23		20	3.300	0.14	0.07	0.00	0.01
24		20	3.500	0.12	0.06	0.00	0.01
25		20	3.700	0.11	0.06	0.00	0.00

附录F 改善层厚度设计、施工验收标准及厚度变更示例

F.1 改善层顶面综合模量计算流程

F.1.1 采用双层层状弹性体系理论的计算模型，采用弯沉等效原则计算综合模量。应遵循下列步骤：

1 分情况计算改善层结构代表应力水平。

1) 对于改善层厚度设计，按（F-1）～（F-3）计算改善层代表应力状态：

$$\sigma_3 = K_0(0.5\rho_0gh_0 + \sigma_0) + \sigma_{D3} \quad (\text{F-1})$$

$$\sigma_d = \sigma_{D1} - \sigma_{D3} \quad (\text{F-2})$$

$$\sigma_c = (1 - K_0)(0.5\rho_0gh_0 + \sigma_0) \quad (\text{F-3})$$

式中， h_0 ——改善层材料厚度

ρ_0 ——改善层材料密度

σ_{D1} 、 σ_{D3} ——分别为行车荷载引起的竖向与水平动应力，kPa，按式（E-4）和式（E-5）计算。

2) 对于改善层顶面模量验收标准计算，和基于模量的改善层厚度变更设计，按（F-4）～（F-6）计算改善层代表应力状态：

$$\sigma_3 = K_0(\rho_0gz + \sigma_{SR} + \sigma_{DR}) \quad (\text{F-4})$$

$$\sigma_d = (1 - K_0)\sigma_{DR} \quad (\text{F-5})$$

$$\sigma_c = (1 - K_0)(\rho_0gz + \sigma_{SR}) \quad (\text{F-6})$$

式中， z ——计算位置，一般为中心，取 $z = h_0/2$ 。

σ_{DR} ， σ_{SR} ——内环动载和外环静载作用下沿深度方向应力分布，按实际测试应力状态确定。对于承载板和 PFWD， σ_{DR} 按弹性半空间圆形刚性分布荷载模式计算（式（F-7））， σ_{SR} 取 0.0；若采用 FWD， σ_{DR} 按弹性半空间圆形均布荷载模式计算（式（E-9）），且 $a_1 = 0.15$ m， σ_{SR} 取 0.0；若路基综合性能原位测试装备，按式（E-9）和式（E-10）确定。

$$\sigma_{DR} = \sigma_p \times \frac{1 + 3(z/a)^2}{2[1 + (z/a)^2]^2} \quad (\text{F-7})$$

式中， a ——加载版半径，m，按实际加载半径取；

σ_p ——测定方法代表应力，按总荷载除以面积计算。

其他符号意义同前。

2 基于应力水平，按式（4-1）计算改善层结构的结构模量 E_1

3 分情况计算路基结构模量 E_2 。

1) 对于改善层厚度设计，按式（F-8）计算；

$$E_2 = [0.649 + 0.024(k_2 - 1.072)(H + h_0)k_2] \times 1.112^{k_1} \times (0.178k_2 + 1.257) \times 1.0007^{(59.810 + k_3)k_3 - 0.093} \times [-12.837(k_1 - 8.991k_0) + 0.984] \quad (\text{F-8})$$

2) 对于改善层顶面模量验收标准，按 4.4.2 条计算。

3) 对于改善层厚度变更设计，先按 4.4.2 条计算，再下式对结果进行修正：

$$\bar{E}_2 = E_2 \times \min(1.0, E_{\text{roadbed-test}}/E_{\text{roadbed-target}}) \quad (\text{F-9})$$

式中， $E_{\text{roadbed-target}}$ ——路堤顶面施工期检验值；

$E_{\text{roadbed-target}}$ ——路堤顶面施工期实测值。

4 路基结构综合模量 E_{eq} 计算。按式（F-10）计算。

$$E_{eq} = \frac{E_1 E_2}{E_2 + (E_1 - E_2) \times \exp\left(-\alpha_L \frac{h_0}{a}\right)} \quad (\text{F-10})$$

式中， a ——荷载半径，m，为承载板半径或当量圆半径，对于改善层厚度设计，考虑应力扩散按式 $a = 0.15 + H$ 估算；对于改善层顶面模量验收标准计算，或改善层厚度变更设计时， a 取实际加载板半径；

α_L ——形状系数，进行改善层厚度设计时取 1.0；进行改善层验收标准计算或厚度变更设计时，对于柔性版荷载取 1.0，对于刚性版荷载取 1.1；

其余符号意义同前。

F.2 改善层厚度设计示例

F.2.1 计算采用路基土为附录 D 中含砂低液限粘土，由于设计湿度状态下结构模量为 45.29 MPa，小于现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）中特重交通 60 MPa 验收要求；且设计湿度状态下结构变形为 10.49 mm，大于路面结构 8.12 mm 的变形控制标准，因此需要开展基于模量和变形的改善层设计。

F.2.2 基于模量的改善层设计示例。

1 参照现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）土工基本性能试验，结果如表 F-1 所示，定义改善层类型为级配碎石。

表 F-1 基本土性参数

比重	最佳含水率	最大干密度	0.075mm 通过率
2.71	5.20%	2.24t/m ³	1.54%

2 按本规程第 4.2 节规定的方法开展改善层材料回弹模量试验，试验工况取 96%压实度和最佳含水率，获得改善层回弹模量模型参数如表 F-2 所示：

表 F-2 改善层回弹模量参数拟合表

k_0^g	k_1^g	k_2^g	k_3^g	相关系数
3.54	0.22	0.13	4.79	0.93

3 假定改善后厚度依次为 5cm，10cm，15cm，20cm，25cm，30cm，40cm，50cm，结合设计含水率下的路床模量参数（表 D-4 工况①）按 6.2.3 条分别计算路床顶面综合模量，结果如表 F-3 所示。

表 F-3 不同改善层厚度的路基整体结构模量

改善层厚度 (cm)	改善层模量 (MPa)	路基模量 (MPa)	路床综合模量 (MPa)
0	/	45.29	45.29
5	361.32	45.38	47.60
10	364.60	45.46	50.02
15	367.93	45.55	52.55
20	371.32	45.64	55.19
25	374.76	45.73	57.95
30	378.25	45.82	60.84
40	385.35	46.00	66.98
50	392.61	46.18	73.65

4 按照沥青路面特重交通模量 60MPa 标准，为 29cm，向上按 5 cm 取整，可得改善层最小厚度应为 30 cm。

F.2.3 基于变形的改善层设计示例。

1 按本规程第 5.2 节规定的方法开展改善层材料永久变形试验，试验工况取 96%压实度和最佳含水率，获得改善层永久变形模型参数如表 F-4 所示：

表 F-4 改善层永久变形参数拟合表

α_0^g	α_1^g	α_2^g	α_3^g	α_4^g	相关系数
0.13	0.06	-0.24	0.93	-2.45	0.93

2 假定改善后厚度依次为 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 40cm, 50cm, 结合设计含水率下的路床和路堤变形参数（表 E-3 工况①和工况②）按 6.2.4 条分别计算改善层、路床和路堤变形, 结果如表 F-5 所示:

表 F-5 不同改善层厚度的路基顶面永久变形

改善层厚度 (cm)	改善层变形 (mm)	路床变形 (mm)	路堤变形 (mm)	总变形 (mm)
0	/	3.39	7.10	10.49
5	0.01	3.17	6.75	9.93
10	0.02	2.97	6.42	9.41
15	0.03	2.78	6.12	8.93
20	0.04	2.62	5.83	8.49
25	0.05	2.46	5.57	8.07
30	0.05	2.32	5.32	7.69
40	0.07	2.07	4.86	7.00
50	0.07	1.85	4.46	6.38

3 按照 8.12mm 的变形控制标准, 为 22 cm, 向上按 5 cm 取整, 可得改善层最小厚度应为 25 cm。

4 路基结构改善层设计取上述计算较大值, 为 $\max(25 \text{ cm}, 30 \text{ cm}) = 30 \text{ cm}$ 。

F.3 改善层施工验收标准计算示例

F.3.1 施工期模量控制标准。带入表 D-4 工况②所示的施工质量含水率下测试参数, 按 6.3.2 条计算方法计算改善层顶面验收模量。计算时, 路面厚度取 0.76m, 改善层厚度 0.30m。

假定以路基综合性能原位测试装备进行验收。测试应力状态为 $\sigma_{dynamic} = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 25\text{kPa}$, 按 (F-4) ~ (F-6) 可计算 30cm 改善层代表应力为 $\sigma_3 = 34.35 \text{ kPa}$, $\sigma_d = 19.93 \text{ kPa}$, $\sigma_c = 10.67 \text{ kPa}$, 可得改善层材料结构模量 E_1 :

$$E_1 = 3.54 \times 101 \times \left(\frac{134.08}{101}\right)^{0.22} \left(\frac{9.39}{101} + 1\right)^{0.13} \left(\frac{5.03}{101} + 1\right)^{4.79} = 485.84 \text{ MPa}$$

路基整体结构模量 E_2 取附录 D.3.1 中路床顶面结构模量结果, 为 $E_2 = 73.46 \text{ MPa}$ 。按式 (F-10) 可得以路基综合性能原位测试装备进行改善层验收的标准为 379.71 MPa。

$$\frac{485.84 \times 73.46}{73.46 + (485.84 - 73.46)\exp\left(-\frac{0.30}{0.10}\right)} = 379.71 \text{ MPa}$$

假定以PFWD进行验收。取 $\sigma_p = 100 \text{ kPa}$ ，按（F-4）~（F-6）可计算30cm改善层代表应力为 $\sigma_3 = 28.14 \text{ kPa}$ ， $\sigma_d = 23.50 \text{ kPa}$ ， $\sigma_c = 1.45 \text{ kPa}$ ，可计算改善层材料结构模量 E_1 ：

$$E_1 = 3.54 \times 101 \times \left(\frac{135.88}{101}\right)^{0.22} \left(\frac{11.08}{101} + 1\right)^{0.13} \left(\frac{0.69}{101} + 1\right)^{4.79} = 380.97 \text{ MPa}$$

路基整体结构模量 E_2 取附录 D.3.1 中路床顶面结构模量结果，为 $E_2 = 73.46 \text{ MPa}$ 。按式（F-10）可得PFWD进行改善层验收的标准为260.25 MPa。

$$\frac{380.97 \times 73.46}{73.46 + (380.97 - 73.46)\exp\left(-1.1 \times \frac{0.30}{0.15}\right)} = 260.25 \text{ MPa}$$

类似的，假定以FWD进行验收。取 $\sigma_{dynamic} = 700 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 0 \text{ kPa}$ ，可计算改善层材料结构模量 $E_1 = 659.66 \text{ MPa}$ ，可得验收标准为317.14 MPa。

类似的，假定以承载板进行验收。取 $\sigma_p = 700 \text{ kPa}$ ，可计算改善层材料结构模量 $E_1 = 614.05 \text{ MPa}$ ，可得验收标准为338.24 MPa。

进而，可汇总各测试方法模量检验指标：

表 F-6 不同模量测试方法改善层顶面检验指标

测试方法	改善层模量 (MPa)	检验标准 (MPa)	应力状态
原位测试装备	485.84	379.71	均布荷载： $\sigma_{dynamic}: 100 \text{ kPa}$ ， $\sigma_{static}: 25 \text{ kPa}$
PFWD	380.97	260.25	刚性荷载： $\sigma_p = 100 \text{ kPa}$
FWD	659.66	317.14	均布荷载： $\sigma_{dynamic}: 700 \text{ kPa}$ ， $\sigma_{static}: 0 \text{ kPa}$
承载板	614.05	338.24	刚性荷载： $\sigma_p = 700 \text{ kPa}$

F.3.2 施工期变形控制标准。带入表 E-3 工况③和工况④所示的施工质量含水率下路床和路堤变形测试参数，按 6.3.3 条计算改善层顶面变形验收标准。计算取 $\sigma_{dynamic} = 100 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 25 \text{ kPa}$ ，作用次数为 10000 次，改善层厚度 0.30m，路床厚度 0.8m 路堤厚度 3.0m。计算见表 F-7，改善层顶面变形验收标准为 0.91mm。

表 F-7 改善层顶面变形验收标准计算表

亚层	层位	厚度 (cm)	代表深度 (m)	竖向动载 (kPa)	水平动载 (kPa)	应变 (%)	变形 (mm)
1	改善层	5	0.025	98.57	52.24	0.074	0.037
2		5	0.075	78.40	41.55	0.062	0.031
3		5	0.125	52.39	27.76	0.047	0.023
4		5	0.175	34.55	18.31	0.035	0.017
5		5	0.225	23.69	12.56	0.026	0.013
6		5	0.275	17.00	9.01	0.021	0.010
7	路床	5	0.325	12.69	6.72	0.160	0.080
8		5	0.375	9.79	5.19	0.132	0.066
9		5	0.425	7.76	4.12	0.110	0.055
10		5	0.475	6.30	3.34	0.092	0.046
11		10	0.550	4.76	2.52	0.071	0.071
12		10	0.650	3.45	1.83	0.051	0.051
13		10	0.750	2.61	1.38	0.038	0.038
14		10	0.850	2.04	1.08	0.028	0.028
15		10	0.950	1.64	0.87	0.022	0.022
16		10	1.050	1.35	0.71	0.017	0.017
17	路堤	20	1.200	1.03	0.55	0.037	0.074
18		20	1.400	0.76	0.40	0.026	0.052
19		20	1.600	0.58	0.31	0.019	0.038
20		20	1.800	0.46	0.24	0.014	0.029
21		20	2.000	0.37	0.20	0.011	0.022
22		20	2.200	0.31	0.16	0.009	0.018
23		20	2.400	0.26	0.14	0.007	0.014
24		20	2.600	0.22	0.12	0.006	0.012
25		20	2.800	0.19	0.10	0.005	0.010
26		20	3.000	0.17	0.09	0.004	0.008
27		20	3.200	0.15	0.08	0.003	0.007
28		20	3.400	0.13	0.07	0.003	0.006
29		20	3.600	0.12	0.06	0.003	0.005
30		20	3.800	0.10	0.06	0.002	0.004
31		20	4.000	0.09	0.05	0.002	0.004

F.4 改善层厚度变更设计示例

F.4.1 改善层厚度变更设计示例。

1 路堤填筑完成后，于顶面开展模量测试和变形测试。模量测试结果为 60.21MPa，变形测试结果为 4.83 mm，均不满足路堤顶面检验标准（模量检验标准 64.30 MPa，变形检验标准 4.08 mm，因此需要进行改善层厚度变更。

2 采用第 8 章路基综合性能原位测试装备在路堤顶面开展永久变形测试，反演路堤永久变形模型参数： $\alpha_0 = 3.13$ ， $\alpha_1 = 0.06$ ， $\alpha_2 = -0.42$ ， $\alpha_3 = 0.86$ ， $\alpha_4 = -4.76$ 。

3 基于模量的改善层厚度变更。假定以路基综合性能原位测试装备进行验收，取改善层厚度调整顶面模量目标值为改善层施工期顶面验收模量，为 379.71 MPa。路基结构模量修正为 $73.46 \times 60.21/64.30 = 68.78$ MPa。改善层材料回弹模量参数取表 F-2，假定改善后厚度依次为 30cm，31cm，32cm，33cm，34cm，35cm。且测试应力状态 $\sigma_{dynamic} = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 25\text{kPa}$ ，改善层厚度应调整为 32 cm。

表 F-8 基于模量要求的改善层厚度变更计算

改善层厚度 (cm)	改善层模量 (MPa)	路基模量 (MPa)	路床综合模量 (MPa)
30	485.84	68.78	373.18
31	481.17	68.78	378.84
32	476.58	68.78	383.82
33	472.08	68.78	388.14
34	467.68	68.78	391.84
35	463.37	68.78	394.95

4 基于变形的改善层厚度变更。取改善层厚度调整顶面变形目标值为改善层施工期顶面验收变形，为 0.91mm。路床填料永久变形参数取表 E-3 工况③，改善层材料永久变形参数取表 F-4。假定改善后厚度依次为 30cm，35cm，40cm，45cm，50cm，计算荷载模式为路基综合性能原位测试装备荷载模式，测试应力状态为 $\sigma_{dynamic} = 100\text{kPa}$ 、 $\sigma_{static} = 25\text{kPa}$ ，按照目标值可得改善层厚度应调整为 39 cm。

表 F-9 基于变形要求的改善层厚度变更计算

改善层厚度 (cm)	改善层变形 (mm)	路床变形 (mm)	路堤变形 (mm)	总变形 (mm)
30	0.13	0.47	0.43	1.04
35	0.14	0.39	0.43	0.96
40	0.15	0.33	0.43	0.90
45	0.15	0.27	0.43	0.85
50	0.15	0.23	0.43	0.80

5 取上述调整结果大值并向上 5cm 取整，改善层厚度宜调整为 40cm。即在原有基础上对改善层加厚 10cm，同时减少路床填土 10cm 厚度。

附录G 路基综合性能原位测试装备原位测试

G.1 路基结构模量测试

G.1.1 路堤顶面和路床顶面结构模量检验步骤如下：

1 测试准备。选取未受扰动测点并整平加载面，调平并锁定反力架，完成内圆板接触精调，安装静载外环、配重和独立位移传感器，并完成预加载；

2 测试加载。在同一测点依次完成表 G-1 的 20 个正式序列。对于加载时长，高液限土应取 0.4s，其余路基土应取 0.2s，间歇时长统一取 0.9s。同步记录各循环的实测荷载和位移，记录每个序列最后 5 次有效循环的平均回弹弯沉；

3 参数反演。结合参数反演算法，以理论回弹弯沉和实际回弹弯沉偏差最小为原则进行参数搜索，获取回弹模量预估模型参数。若相对平均偏差大于 10%，则本次测试无效，需要重新选点开展试验。

4 结果输出。代入 4.4.2 条当量应力水平，结合式（4-1）计算结构模量。

表 G-1 路基结构模量加载方案

序列	静压力（kPa）	循环应力（kPa）	加载次数
预加载	15	60	1000
1	2.5	50	100
2	2.5	60	100
3	2.5	80	100
4	2.5	100	100
5	5	50	100
6	5	60	100
7	5	80	100
8	5	100	100
9	10	50	100
10	10	60	100
11	10	80	100
12	10	100	100
13	15	50	100
14	15	60	100
15	15	80	100
16	15	100	100
17	25	50	100
18	25	60	100
19	25	80	100
20	25	100	100

G.1.2 改善层顶面结构模量检验步骤如下：

1 测试准备。选取未受扰动测点并整平加载面，调平并锁定反力架，完成内圆板接触精调，安装静载外环、配重和独立位移传感器，并完成预加载；

2 测试加载。在同一测点首先开展预加载，然后只开展序列 20 加载，同步记录循环的实测荷载和位移，记录最后 5 次循环加载的平均回弹弯沉；

3 采用峰值法（式（G-1））计算各该序列回弹模量，并输出结果。

$$E = \alpha_E \frac{2pa(1 - \mu^2)}{w_{resilient}} \quad (G-1)$$

式中， α_E ——加载模式调整系数。对于承载板和 PFWD，为 $\pi/4$ ；对于路基综合性能原位测试装备和 FWD，取 1.0；

p ——平均应力，通过总荷载除以加载板面积计算；

$w_{resilient}$ ——回弹弯沉；

μ ——泊松比，路基土通常取 0.35；

E ——模量。

G.2 路基结构永久变形测试

G.2.1 路堤顶面、路床顶面、改善层顶面结构变形检验步骤如下：

1 测试准备。选取未受扰动测点并整平加载面，调平并锁定反力架，完成内圆板接触精调，安装静载外环、配重和独立位移传感器，并完成预加载；

2 静压加载。施加 25 kPa 静压力 30 min，将位移清零。

3 循环加载。在基础上叠加 100kPa 的循环荷载，持续加载 10000 次，记录每一周期结束时的永久变形，并取最终累计永久变形作为测试结果。对于加载时长，高液限土应取 0.4s，其余路基土应取 0.2s，间歇时长统一取 0.9s。

G.2.2 路堤顶面永久变形模型参数反演步骤如下：

测试时需选取 6 个独立的测点，相邻测点间直线距离应大于 10m 且小于 20m，且各测点应处于外侧车道轮迹带上。对于单个测点，按下列步骤开展测试：

1 测试准备。选取未受扰动测点并整平加载面，调平并锁定反力架，完成内圆板接触精调，安装静载外环、配重和独立位移传感器，并完成预加载；

2 静压加载。施加静压力静压 30 min，静压结束后将位移清零，静压力大小参照表 G-2 选取。

3 循环加载。在静压基础上叠加循环荷载，持续加载 2000 次，记录每一周期结束时的永久变形，循环荷载大小参照表 G-2 选取。

测试完成后，以不同应力状态下的各周期理论永久变形和实际永久变形偏差最小为原则进行参数搜索，获取永久变形预估模型参数。对于平均偏差大于 15%的测点数据，应舍弃并需要重新选点开展试验。

表 G-2 路基结构永久变形测试应力状态

测点	静压力 (kPa)	循环应力 (kPa)	加载次数
C ₁	2.5	100	2000
C ₂	5	90	2000
C ₃	10	80	2000
C ₄	15	70	2000
C ₅	20	60	2000
C ₆	25	50	2000

附件

《湿热地区耐久性公路填方路基技术规程》

(T/CECS G: DXX-XX-2026)

条文说明

1 总则

1.0.1~1.0.2 本规程启发源于 2011 年 973 计划前期研究专项“南方湿热地区耐久性路基湿度平衡理论研究”，历经 15 年，围绕这一主题陆续完成了国家自然科学基金青年基金、面上项目、科技部重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目，形成了湿热地区耐久性路基成套理论。本规程以“湿度稳定、刚度可知、变形可控”为目标，构建“湿度稳定→刚度可知→变形可控→施工验收”的全过程技术路线，章节安排遵循“湿度设计→模量设计→变形设计→施工控制→质量验收”的技术主线。

1.0.3 本规程差异化执行的规定与各章技术内容相对应：湿度设计、施工与质量检验适用于各等级公路；路基结构模量精细化计算适用于三级（细粒土路基）及以上公路，三级公路粗粒土路基和四级公路沿用湿度调整的简化方法；路基结构永久变形计算与控制标准适用于高速公路、一级公路和二级公路。永久变形模型参数需采用动三轴试验获得，加载次数多达 10000 次，目前尚没有类似于回弹模量的基于物性参数预估的方程，这部分内容将在下一次规程修订时补充，补充后可将三级公路半刚性路面结构纳入变形设计适用范围。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 湿热地区是本规程确定适用范围的基础，也是开展路基长期湿度、模量和永久变形设计的重要区域条件。本规程对湿热地区的划分是在《公路自然区划标准》（JTJ 003—86）既有一级自然区划框架和区划思想基础上，结合近年来全国气象资料及本规程耐久性填方路基长期湿度设计需求，对相关区域进行专项界定。

在温度条件方面，本规程采用多年平均 1 月气温大于 0℃和多年平均气温不低于 14℃共同表征“热”。其中，1 月平均气温大于 0℃主要用于排除冬季存在稳定冻结影响的地区，使本规程重点研究湿热环境下的路基湿度、模量和永久变形问题，避免与冻融控制问题交叉；年平均气温不低于 14℃则用于进一步保证区域具有持续温暖的气候背景，剔除因蒸发能力较弱而潮湿系数较高的寒冷湿润地区。

在水分条件方面，本规程采用潮湿系数和年降雨量共同表征“湿”：

$$K = \frac{P}{E_t} \quad (\text{说明 2-1})$$

式中， K ——潮湿系数

其他符号意义同前

同时考虑降雨输入和蒸发输出，当 $K \geq 1.0$ 时，表明多年尺度上降雨量不低于蒸发量，区域水分收支总体处于平衡或偏湿状态；年降雨量 800 mm 为我国湿润气候区划中长期采用的典型辅助指标，可直接反映区域降雨补给水平。本规程采用“ $K \geq 1.0$ 或 $P \geq 800\text{mm}$ ”的并列判据，是为了在以水分收支为主要判据的同时，补充部分降雨充足但因蒸发能力较强导致 K 略低于 1.0 的湿润过渡地区。

本规程湿热地区范围的确定采用了更新后的全国气象资料进行重新分析。编制过程中收集了全国 2366 个气象站的站点位置、多年月平均气温、年平均气温、年降雨量和年蒸发量等资料，各指标采用了连续不少于 15 年的多年平均值。

首先计算各站潮湿系数，并分别判定 1 月平均气温、年平均气温、潮湿系数及年降雨量；随后对各气象指标进行空间插值，形成全国温度、降雨和潮湿系数连续分布场如图 2-1 所示，并按照式（A-1）确定初始气候范围：

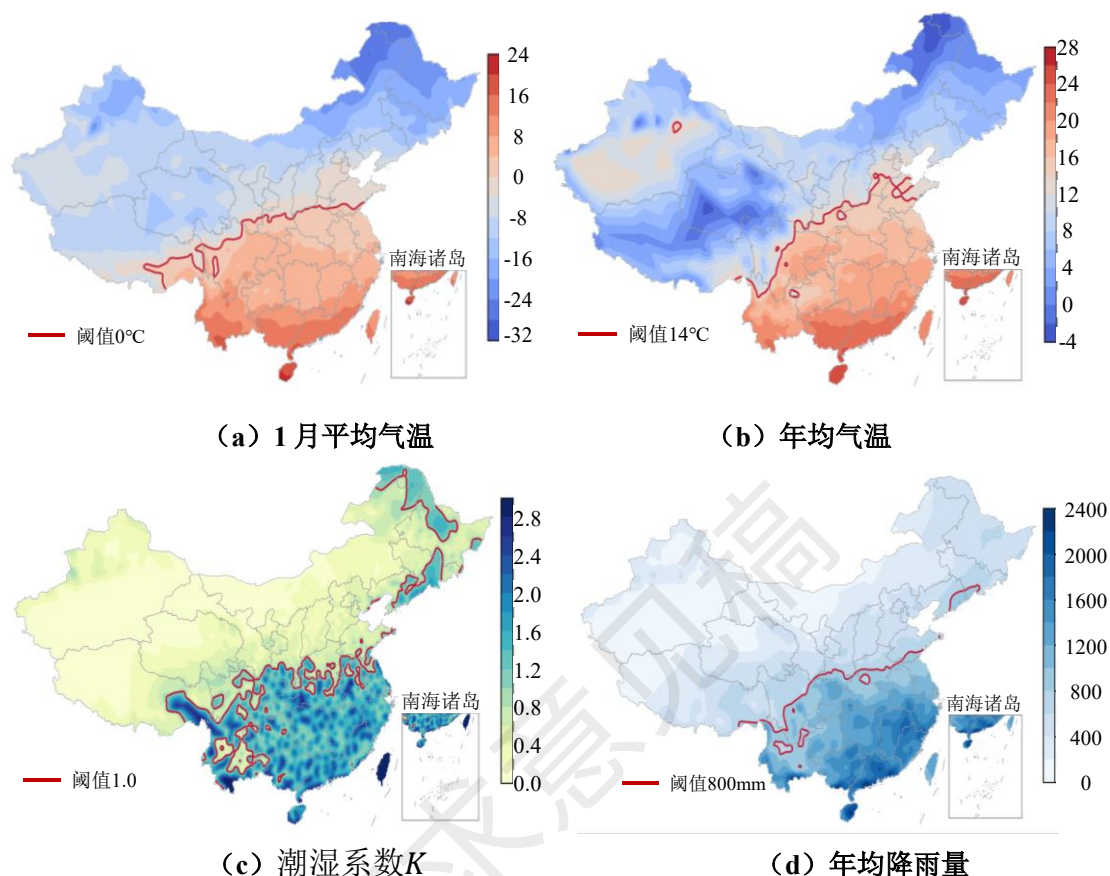


图 2-1 各指标全国分布图

在初始气候范围基础上，结合区域空间连续性、周边气象站长期观测结果及区域气候特征对边界进行校核和规整，减少局部站点异常和空间插值误差对区划边界的影响；台湾省及南海诸岛部分区域长期气象站资料相对不足，其范围结合国家气候区划资料、邻近气象站长期观测结果以及热带、亚热带湿润气候背景综合确定，并在附图中完整表示。

为检验气象判据与路基长期湿度状态的一致性，编制过程中进一步采用本规程建立的平衡湿度计算方法，对候选区域内代表性填料的长期平衡湿度进行分析。结果表明，按式（A-1）划定区域内代表性细粒土的平衡体积含水率总体处于较高水平，代表性计算均值约为 $0.186 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，较施工初始体积含水率 $0.136 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 增加约 37%，表明所划定区域内路基运营期具有较明显的长期增湿特征，

所采用的温度—水分联合判据与本规程针对湿热环境开展路基长期湿度、模量和永久变形设计的技术目标一致。

2.1.2 路基在现行设计体系内没有设计寿命相关指标，因而本规程所述耐久性路基同样不做设计寿命要求，以设计使用年限内保持湿度稳定、模量可靠、变形可控为基本要求。

2.1.3~2.1.4 这两条术语需区分“设计含水率、平衡质量含水率、施工质量含水率”的概念：平衡质量含水率是气候等因素导致的路基运营多年后的湿度状态；本规程以平衡质量含水率作为设计含水率，用于模量、变形等力学性能设计；施工质量含水率是由压实度和 CBR 双控确定并经试验段验证的填筑施工控制区间，选取时应与平衡质量含水率相适应，以减小运营期湿度波动。

2.1.5 路基结构模量与路基土回弹模量需区分：室内试验获得的是材料回弹模量，结构计算获得的是考虑湿度、干密度与应力状态非均匀分布及路面结构约束的路基整体结构模量。由于路基内部湿度、应力状态在时空上均为非均匀分布，模量场也呈非均匀分布特征，结构模量为路基结构在特定湿度、路面结构与行车荷载下的整体代表模量，在不同服役条件下其值不固定。

2.1.6 路基结构模量与路基土永久变形需区分：室内试验获得的是材料永久变形，反映的是路基内单个点在特定湿度、干密度和应力水平下永久应变与荷载作用次数的关系；路基结构永久变形是行车荷载反复作用引起的路基非均匀累积变形，不包含路基本体自重沉降与地基沉降，是本规程的新增设计指标。

2.1.7 永久变形控制标准为本规程新增控制指标，以路面结构满足服役性能要求反推确定容许的路基顶面最大永久变形，体现路基路面协同设计思想。

2.2 符号

2.2.1~2.2.4 符号和后边章节对应，采用湿度参数、模量参数、变形参数和其他参数进行分类。

3 路基湿度设计

3.1 一般规定

3.1.1 湿热地区降雨丰沛、气温较高，路基填料天然质量含水率通常偏高，部分填料天然质量含水率高于最佳质量含水率，施工中通过翻晒等措施将其稳定降低至最佳质量含水率难度较大。另一方面，路基投入运营后长期受到降雨、蒸发、地下水补给及排水条件等因素影响，含水率由施工初始状态逐步演变，并最终在一定范围内周期波动，形成长期动态平衡状态。

施工期和运营期湿度设计目标不同。施工期以满足压实度和承载性能要求为基本目标，在保证施工质量的前提下合理拓宽最佳质量含水率湿侧的可施工范围，减少偏湿填料的调湿工作量；运营期则以长期平衡湿度状态作为路基性能设计的湿度基础，使模量和变形参数能够反映长期服役状态，避免按施工初始含水状态取值造成长期性能高估。

3.1.2 路基长期湿度状态受气候、水文、排水条件及填料性质共同影响。长期降雨量和蒸发量反映区域水分输入与输出条件，地下水位反映地下水对路基的长期补给条件，填料颗粒组成、液塑限、土粒比重及击实特性等用于表征填料类型、孔隙状态及持水特征。因此，湿度设计需收集相应气象、水文、排水和填料基本性质资料。连续不少于 15 年的气象资料主要用于降低个别异常年份对长期湿度状态确定的影响。

3.1.3 路基长期湿度不仅受填料自身持水特性控制，还与地表径流、地下水补给及路面、边坡和地下排水条件密切相关。有效的防排水体系可削弱外界水分补给，控制路基长期湿度水平及其变化幅度。本规程不重复规定具体防排水构造，其设计按现行《公路路基设计规范》（JTG D30）的有关规定执行。

3.2 施工质量含水率设计

3.2.1~3.2.2 目前路基施工中通常以击实试验确定的最佳质量含水率作为压实施工的重要控制依据。最佳质量含水率是在规定击实功下取得最大干密度所对应的含水状态，但并不意味着高于最佳质量含水率的填料不能达到规定压实度和满足路基承载性能要求。

湿热地区路基填料天然质量含水率通常较高，部分填料天然状态处于最佳质量含水率湿侧，若要求施工质量含水率严格接近最佳质量含水率，往往需要较长时间翻晒降湿，并易受天气和施工工期影响。因此，本规程以最佳质量含水率为施工质量含水率设计起点，在其湿侧首先根据击实曲线确定满足压实度要求的含水率范围，再根据不同初始含水率下 CBR 试验确定满足承载性能要求的含水率范围，并取两者交集作为施工质量含水率设计范围。施工质量含水率设计方法示意图 3-1。该方法在同时满足压实度和 CBR 要求的前提下，合理利用最佳质量含水率湿侧仍具有良好可压实性和承载能力的含水状态，从而提高湿热地区偏湿填料的施工适应性，减少调湿工作量。

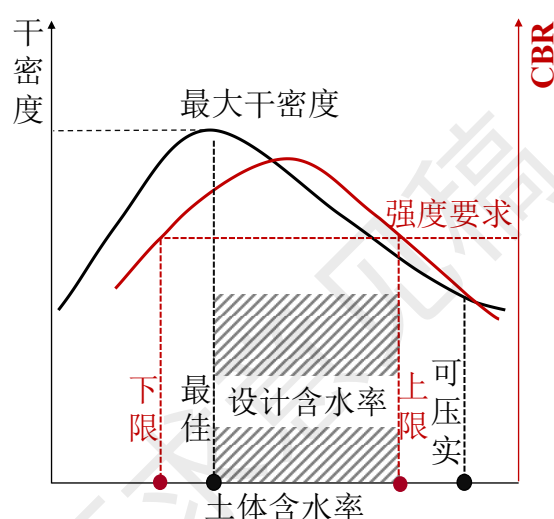


图 3-1 路基施工质量含水率设计方法

例如，某高速公路路基黏性土填料，通过湿土法重型击实试验确定最佳质量含水率为 14.3%，同时通过击实曲线表明，随含水率增加，满足压实性能要求的湿侧上限为 19.3%。以最佳质量含水率为参照，设置不同初始质量含水率开展湿土法 CBR 试验，结果表明满足 CBR 要求的含水率范围为 14.3%~19.1%。两者取交集后，该填料施工质量含水率设计范围确定为 14.3%~19.1%。

3.2.3 室内试验确定的施工质量含水率设计范围反映填料在规定试验条件下满足压实度和 CBR 要求的含水率区间。现场压实效果还受松铺厚度、压实机械、碾压方式及施工组织等因素影响，因此需通过试验段验证其现场施工适用性。

经试验段确定的施工质量含水率控制范围可与设计范围一致，也可根据现场施工能力适当缩小，但不应超出设计范围。设计范围与现场控制范围分别属于室内性能设计成果和现场施工验证成果，二者不宜混用。

3.3 路基运营期湿度设计

3.3.1 路基投入运营后，受降雨、蒸发、地下水补给及排水等因素长期共同作用，路基含水率由施工初始状态逐渐演变至年际平均湿度变化趋缓、年内仍随季节性气候变化产生周期性波动的动态平衡状态。以长期平衡湿度状态作为路基性能设计的湿度基础，可使设计参数更能反映长期服役状态，避免按施工初始湿度确定长期性能参数产生偏差。

3.3.2~3.3.3 现行《公路路基设计规范》（JTG D30）已建立路基平衡湿度确定方法，主要根据气候、水文及土质条件表征路基长期湿度状态，具有较好的工程应用基础。其湿度以饱和度进行表征，与本规程后续模量和永久变形设计直接采用质量含水率作为材料状态参数的需求有所不同；同时，平衡湿度取值时对动态平衡后的季节性波动及其不利湿度水平考虑不足，与本规程面向路基耐久的精细化设计需求匹配度较差。为此，本规程面向三级及以上公路模量和变形精细化设计，提出了直接预测平衡质量含水率的理论-经验模型法。

理论-经验模型法是基于路基长期水分迁移理论计算建立的工程简化预估模型。模型综合了全国 2000 余个气象站 15 年的长期气象资料和地下水位信息，选取 100 余种典型路基填料水力参数，设置超 10000 组工况进行批量计算，获取不同气候、水文和填料条件下的路基湿度演变过程，在路基达到动态平衡后，以连续 5 年内行车道中心路基代表湿度的月平均中的最大值作为长期设计湿度状态，形成平衡质量含水率样本数据库；在此基础上，采用基因表达式编程（GEP）建立平衡质量含水率的工程简化预测公式，预测精度 R^2 超 0.95。

理论-经验模型综合考虑下列三类因素：气候条件，采用年降雨量和年均蒸发量表征长期水分输入和输出；地下水条件，采用地下水埋深表征地下水对路基的长期补给条件；填料持水和压实特性，采用饱和和体积含水率、残余体积含水率、进气特征参数、曲线形状参数及干密度表征。

四级公路长期性能设计精细化程度相对较低，可继续采用现行《公路路基设计规范》（JTG D30）规定的平衡湿度方法，与现行设计体系保持衔接。

进一步地，在采用试验法确定平衡湿度计算必要的路基填料土水特征曲线参数时，附录 B 在现行《非饱和土试验方法标准》（T/CECS 1337）规定方法的基础上，另给出了基于轴平移技术的快速压力板仪法。该方法仍采用轴平移技

术控制基质吸力，其主要特点是以亲水微孔膜与致密透水石组成水气交换结构，利用亲水微孔膜厚度小、亲水以及致密透水石连续支撑的特点，加快试样与量测水路之间的水分交换；同时通过自动水体积量测、循环气泡冲刷和分级气压控制，实现土水特征曲线的连续自动测试。

图 3-2 所示为快速压力板仪实物。该设备包括压力室与气压施加、水体积量测与气泡冲刷以及数据采集与控制等系统，与附录 B 所规定的仪器组成相对应。前期采用 $0.1\ \mu\text{m}$ 聚醚砜亲水纤维膜与致密透水石组合水气交换结构进行路基土土水特征曲线测试，试验时间较采用传统陶土板的压力板仪可缩短超 90%，在此基础上进一步优化水气交换结构，采用 $0.1\ \mu\text{m}$ 混合纤维素酯亲水微孔膜与致密透水石组合，其稳定基质吸力测试范围由 390 kPa 提高至 600 kPa，提高 54%。

为验证快速压力板仪的测试可靠性，选取典型路基细粒土，在相同试样状态下分别采用混合纤维素酯亲水微孔膜-致密透水石组合、聚醚砜亲水纤维膜-致密透水石组合和传统烧结陶土板作为水气交换结构开展对比试验。土样经风干、碾散后按最佳质量含水率配制并制备试样，真空饱和 24 h 后安装于压力室内；亲水微孔膜、致密透水石及连通水路均充分饱和，并与试样底面紧密接触。完成装样和管路排气后，按由低至高的顺序逐级施加气压力，通过水体积量测系统连续记录排水量，各级达到附录 B 规定的水分平衡条件后进入下一级试验，并根据各级平衡状态下的累计排水量确定相应含水率，绘制土水特征曲线。采用混合纤维素酯亲水微孔膜组合结构时，基质吸力依次取 1 kPa、5 kPa、10 kPa、25 kPa、60 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 和 600 kPa；聚醚砜亲水纤维膜组合结构和传统陶土板则分别在其允许 390kPa 和 500kPa 的工作范围内进行测试。

对比结果见图 3-3。在共同基质吸力范围内，三种水气交换结构所得土水特征曲线变化规律基本一致，各级基质吸力下体积含水率测试结果最大偏差不超过 3%；同时，采用亲水微孔膜与致密透水石组合时单级基质吸力下的试验时间约为 4h，而采用陶土板时约为 48h，可显著缩短土水特征曲线测试时间。上述结果表明，快速压力板仪在提高试验效率和测试范围的同时，可保持与传统压力板仪较好的一致性，能够满足路基填料土水特征曲线参数快速获取的需要。

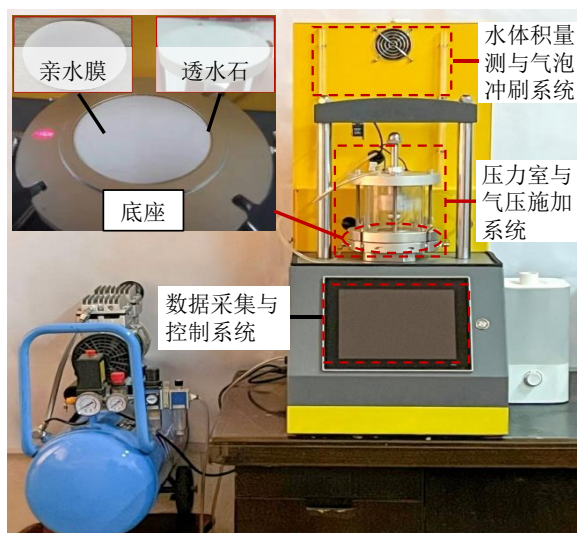


图 3-2 基于轴平移技术的快速压力板仪实物

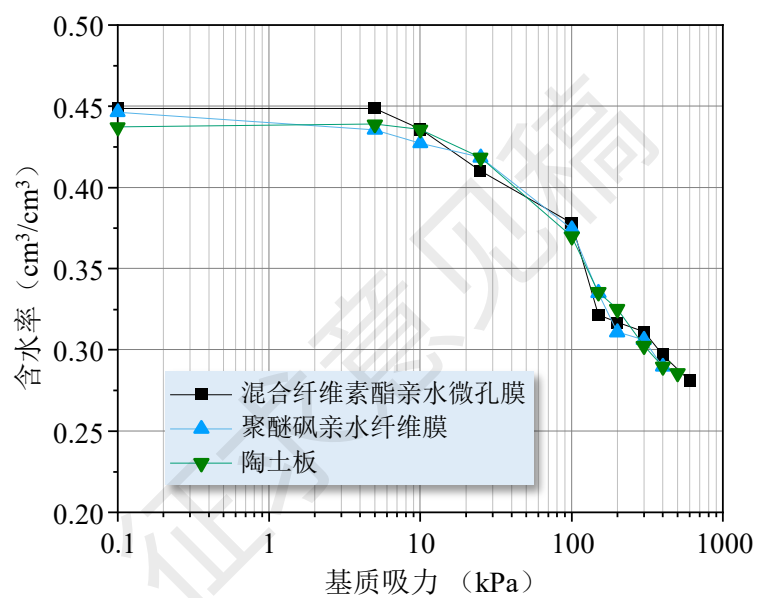


图 3-3 不同水气交换结构下土水特征曲线结果对比

4 路基模量设计

4.1 一般规定

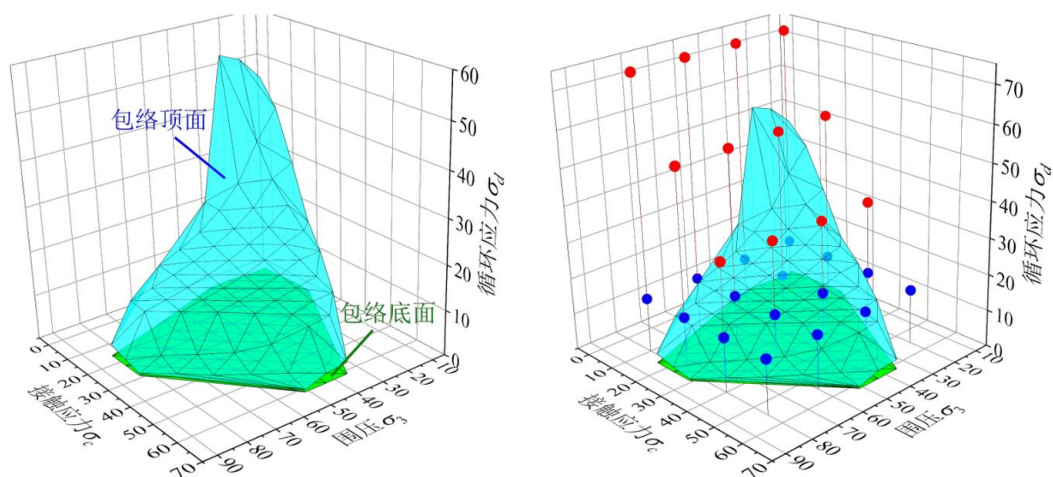
4.1.1 本条规定了路基模量参数体系的层次关系与设计流程。室内试验获得的是路基土材料回弹模量，结构计算获得的是路基结构模量，原位测试获得的是现场等效模量，三者通过非均匀模量场理论与湿度修正建立定量联系，避免设计取值与验收检验脱节。路基模量随含水率增大而显著衰减，模量取值必须以第 3 章湿度设计确定的湿度状态为前提，体现“湿度稳定是刚度可知的基础”；同时，路基内部应力状态、湿度在时空上均为非均匀分布，模量场在时空上也具有非均匀分布特征，结构模量为路基结构在特定湿度、路面结构、行车荷载下的整体代表模量，在不同的服役条件和应力水平下其值是不固定的。

4.1.3 现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）、《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG D40）在进行路面设计时，通常基于确定的路基模量为前提，进而计算路面结构受力并进行验算。现行规范将路基模量视为不同等级路面结构的要求和前提，因此本规程继承这一思想，模量控制指标直接继承现有规范要求。

4.2 路基土回弹模量试验与预估

4.2.1 加载序列采用三维移动荷载作用下的多层层状弹性体系理论解析解开展大量计算后分析获得，主要统计了路基顶面以下 5.0m 深度范围内的路基内部应力分布。计算覆盖了 0.3~1.0m 的路面厚度范围，涵盖了所有公路等级。进而在三轴应力空间坐标系内绘制路基土应力状态包络面，并选取 28 个代表性应力状态点作为加载序列，见图 4-1。

路基土通常具有一定的黏弹性，但整体不高。编写组试验表明，对于高液限黏土，荷载作用时长从 0.1s（对应行车速度 120km/h）增加至 0.7s（对应行车速度 20km/h），回弹模量仅下降 7%左右。考虑到试验耗时与方法的易推广性，本条未要求设置多档加载时长，仅规定高液限土采用 0.4s、其余土采用 0.2s 的加载时长。



(a) 路基土应力状态包络面 (b) 路基土典型应力状态点选取

图 4-1 路基土应力状态包络面及典型应力状态点选取

4.2.2 现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 以最佳含水率制样并考虑湿度折减系数来确定平衡湿度状态下的回弹模量, 这种做法受主观影响较大。本规程摒弃了这一思路, 直接采用第 3 章确定的平衡质量含水率和施工质量含水率制样, 确保试验条件和实际状态一致, 因此无需对结果湿度修正, 试验结果可直接用于计算结构模量和施工检验及验收标准, 确保了设计的客观性。

此外, 这里在制样时未考虑设计状态工况下的路堤这一工况, 这是由于对于回弹模量, 主要是路床在起作用。当路床路堤模量差别没有达到 2 倍以上时, 路堤的模量几乎不会对路基结构模量产生较大影响, 因此制样时无需制作这一工况的试样。

4.2.3 现行《公路土工试验规程》(JTG 3430) T 0194 加载序列所配回弹模量预估模型为美国 AASHTO 规范中的 NCHRP 1-28A 三参数模型, 如式(说明 4-1) 所示。该公式未区分偏应力的动静来源。

$$M_R = k_1^N p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2^N} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3^N} \quad (\text{说明 4-1})$$

式中: σ_3 、 σ_d 、 σ_c ——分别为围压、循环应力与接触应力(kPa)。

k_1^N 、 k_2^N 、 k_3^N ——回弹模量模型参数, 由试验拟合确定;

θ ——体应力(kPa), 三轴试验条件下 $\theta = 3\sigma_3 + \sigma_d + \sigma_c$;

τ_{oct} ——八面体剪应力(kPa), 三轴试验条件下 $\tau_{octD} = \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_c + \sigma_d)$

p_a ——标准大气压(kPa), 取 101.3kPa;

编写组曾针对黏性土开展固定体应力 θ 及八面体剪应力 τ_{oct} 、调整动、静八面体剪应力所占比例的动三轴试验，结果表明： τ_{octS} 占比从 0.1 提升至 0.9 时，路基土回弹模量相差 4 倍以上。因此，三参数模型仅能适应静偏应力很小的路基范围，即路床浅层区域，《公路土工试验规程》（JTG 3430）T 0194 中设置 $\sigma_c = 0.2\sigma_3$ 亦是为了适应这一情况。本规程在预估模型中区分了偏应力的动静来源，并在加载序列上将 σ_c/σ_3 覆盖范围扩展至 0.13~3.67，以涵盖路基更深处的应力状态。

此外，路基土通常处于非饱和状态，不少研究将基质吸力作为单独一项用于构建回弹模量预估模型，这种方式从理论层面而言更符合实际。但吸力的确定通常较为麻烦且很耗时，因此不适合工程使用。虽然项目组随基于基质吸力也构建了一系列模型，但本规程中并未将基质吸力纳入进来。基于平衡质量含水率前提制样开展试验并拟合参数，基质吸力这一因素可自然考虑。

4.2.4 南方湿热地区极端最高气温可达 40℃以上，而室内回弹模量试验通常在标准室温（25℃±2℃）条件下进行。温度升高将显著降低细粒土的基质吸力与颗粒间有效应力，导致回弹模量衰减。室内试验表明，该类土在 20℃~40℃范围内的模量温度敏感性约为 0.5%/℃~1.0%/℃，当试验温度与现场极端高温相差 20℃时，模量降幅可达 10%~20%。若直接采用室温试验结果进行设计，将高估路基模量，导致路面结构厚度偏薄、车辙预估不足。因此在修正时基于保守考虑，对于结构模量计算，试验温度低于实际温度，应对结果进行折减；对于检验标准计算，试验温度高于实际温度，应对结果进行适当放大。由于升高温度后，所有加载序列下回弹模量都有所减小，因此对 k_0 进行折减。

4.2.5 本条预估公式由现行《公路路基设计规范》（JTG D30）物性状态预估模型经转换获得。现行规范基于 NCHRP 1-28A 模型并结合我国大量路基土动三轴试验结果，建立了式（说明 4-2）~（说明 4-4）所示经验关系：

$$k_1^N = -0.0960\omega + 0.3929\rho_d + 0.0142I_p + 0.0109P_{0.075} + 1.0100 \quad (\text{说明 4-2})$$

$$k_2^N = -0.0005\omega - 0.0069I_p - 0.0026P_{0.075} + 0.6984 \quad (\text{说明 4-3})$$

$$k_3^N = -0.2180\omega - 3.0253\rho_d - 0.0323I_p + 7.1474 \quad (\text{说明 4-4})$$

式中： ω ——含水率（%）；

ρ_d ——干密度 (g/cm^3) ;

I_p ——塑性指数 (%) ;

$P_{0.075}$ ——细粒含量 (%) 。

进而, 以 T 0194 细粒土各加载序列下回弹模量结果匹配为原则, 基于 495 万组数据建立了 NCHRP 1-28A 三参数模型到本规程四参数模型的参数换算关系, 如式 (说明 4-5) ~ (说明 4-8) 所示。该转换关系误差在 1% 以内, 相关系数达 0.99, 可作为经验确定方法。最后, 将式 (说明 4-2) ~ (说明 4-4) 代入式 (说明 4-5) ~ (说明 4-8), 消去 k_1^N 、 k_2^N 、 k_3^N , 即可得到以物性状态为基本参数的回弹模量预估模型经验公式。

$$k_0 = 0.107 + 0.899k_1^N - 0.065k_2^N + 0.040k_3^N \quad (\text{说明 4-5})$$

$$k_1 = 0.019 - 0.009k_1^N + 0.853k_2^N + 0.049k_3^N \quad (\text{说明 4-6})$$

$$k_2 = -0.016 + 0.013k_1^N + 0.187k_2^N + 0.894k_3^N \quad (\text{说明 4-7})$$

$$k_3 = -2.967(k_2^N - 4.374)(k_2 - 0.914k_3^N) \times 0.990^{k_1} \times \exp(0.327k_2^N - 0.020k_3^N) \quad (\text{说明 4-8})$$

4.3 路基结构模量计算

4.3.2 正文式 (4-4) 按关键响应等效原则建立。编写组曾分析过采用弯沉等效和压应变等效计算结果差异, 发现采用弯沉等效获得的路基等效模量较压应变等效高 5% 左右, 基于保守考虑, 本规程采用路基顶面压应变作为等效指标。

计算分三个步骤: 首先, 代入路基土回弹模量本构模型, 开展移动荷载作用下路基路面结构动力响应计算; 其次, 假定一系列不同的路基线弹性模量, 以路基顶面压应变等效为原则, 获取路基等效整体模量; 最后, 对计算结果进行拟合得到结构模量计算公式。计算涵盖了 0.3~1.0m 路面厚度范围, 计算工况共 7200 组, 每组工况的路基回弹模量模型参数采用随机抽样方法确定。由于路面结构模量远高于路基模量, 路面各结构层模量取值对路基结构模量计算结果的影响较小 (5% 以内), 故该公式可适用于各类路面结构。

4.3.3 对于三级公路 (粗粒土路基) 和四级公路路基, 由于缺乏路基土回弹模量模型参数, 因此无法按照经验公式进行计算, 因而沿用现有《公路路基设计规范》(JTG D30) 思路, 通过湿度折减系数获得平衡湿度下路基结构模量。

4.3.4 《公路路基设计规范》(JTG D30) 通过室内动三轴试验开展最佳含水率下的回弹模量试验, 结合干湿循环折减系数和冻融循环折减系数来反映气

候环境的影响，折减系数选取本身具有较大经验性。本规程直接以平衡质量含水率开展试验，因此无需按照现行规范进行折减，可直接作为路基设计模量。

4.4 模量施工分层检验标准

4.4.2 本条代表应力水平由现行《公路路基设计规范》（JTG D30）当量应力水平（ $\theta = 70 \text{ kPa}$ 、 $\tau_{oct} = 13 \text{ kPa}$ ）经转换获得。编写组就该当量应力水平的来源进行了理论分析，随机抽取 400 组路基参数开展承载板计算，通过弯沉反推模量，其结果与当量应力水平下的模量基本相当（图 4-2）。因此本规程沿用这一代表应力状态来计算模量检验标准值，适用于第 8 章所有模量测试方法。

编写组对比了承载板、FWD、PFWD 三种测试方法的模量测试结果。FWD、PFWD 测试结果易受路基土黏弹性影响，对黏性较弱的路基土（如沙性土），上述测试方法结果区别不大，在 20% 以内；对于黏性较强的土（如高液限粘土），FWD/PFWD 等方法易高估路基模量，可高估一倍以上；从测试稳定性而言，承载板法变异性较低、在所有传统测试方法中结果最为稳定。

较以上传统测试方法，路基综合性能原位测试装备能在现场直接获取路基土回弹模量模型参数 k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 ，避免了应力状态对测试结果的影响。在获得路基土回弹模量参数前提下，带入当量应力水平即可获得模量。

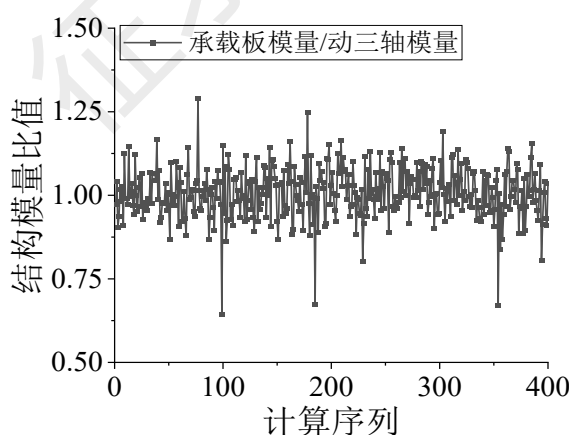


图 4-2 承载板模量与动三轴当量应力水平模量对比

4.4.3 通常，路基结构模量计算还需考虑路面自重和约束，但由于四级道路不做回弹模量试验要求，无法评估这一影响。因此这里将规范设计模量要求考虑湿度折减后直接作为路床顶面的目标值，即通过平衡湿度状态下满足规范要求来反推施工阶段应有的模量值。这种做法实际忽略了路面结构对路基模量的增强效果，在设计上偏保守。

5 路基变形设计

5.1 一般规定

5.1.1~5.1.4 本规程路基永久变形定义为行车动载引起的路基非均匀沉降，本身不包含地基沉降和路基在自重作用下的本体沉降，主要用于评估运营期路基在行车动载反复作用下的产生的变形。该指标属于新的路基指标，是湿热地区耐久性路基设计中的特色指标，亦是本规程的路基核心设计指标。由于该指标不属于现有规范设计体系，因此本规程中的永久变形测试推荐采用编写组研发的路基综合性能原位测试设备开展。

5.2 路基土永久变形试验与预估

5.2.1 通常，对于岩土工程构造物，需要通过三轴剪切确定粘聚力和内摩擦角，进而获得强度水平，试验时需要结合实际受力和强度水平判断岩土构造物是否处于塑性安定区间。而对于道路工程而言，正常服役下路基顶面荷载通常不会超过 50kPa，高速公路一般在 10kPa 左右。应力通常远小于抗剪强度，加之受路面结构约束，基本处于塑性安定应力状态。因此本规程不开展安定状态相关分析，默认路基土在正常服役条件下均处于塑性安定状态。进而，循环应力峰值不再基于应力水平方式确定，而是参考回弹模量预估模型加载序列进行选取。此外，考虑到永久变形试验每一个应力状态都需要单独制样开展试验，试验量较大，因而仅选取表 C-1 中第 13、16、17、20、21、24 序列，对应循环应力范围为 15kPa~55kPa。

试验中“只施加围压和接触应力，在此状态下静压”是为了模拟施工过程中的路基自身由于自重应力的沉降，循环荷载则是模拟运营期车辆反复作用。由于本章主要关注行车荷载反复作用下的非均匀沉降，在循环加载之前需将静载产生的变形清零。对于静压时长，编写组针对黏土开展的试验表明，围压越大变形稳定时间越长，一般 60min 足够达到稳定状态（图 5-1），该时长可作为试验参考。试验时，需要同步记录静压阶段产生蠕变变形。但由于路基本体变形并不是本规程关注的重点，因此本规程并未就静压蠕变开展进一步处理。

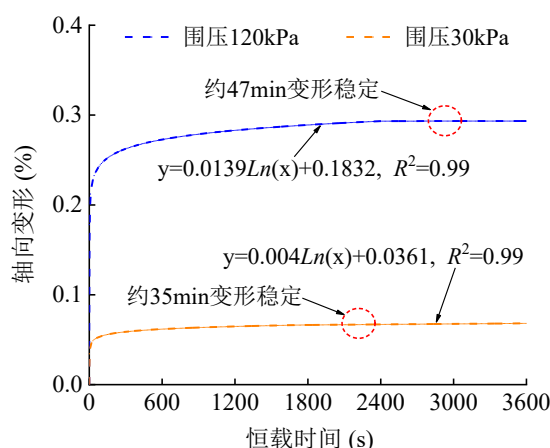


图 5-1 静载作用下路基土轴向变形稳定过程

5.2.2 由于路基结构永久变形计算采用分层总和法，路床和路堤都需要划分亚层计算变形，因此无论是设计还是施工检验指标，都需要针对路堤和路床开展试验。因此本规程采用第 3 章确定的施工质量含水率和平衡质量含水率分别对路堤和路床进行制样，共需 4 种工况。以确保试验状态和实际服役条件保持一致，因此无需进行任何湿度修正，确保了变形设计的客观性。

5.2.3 类似于回弹模量预估模型，现有永久变形预估模型在构建时大多未区分偏应力的动静来源。编写组曾针对黏土开展固定围压 σ_3 及循环应力 σ_d 、调整接触应力 σ_c 的动三轴试验。结果表明， σ_c 从 $0.2\sigma_3$ 提升至 $0.8\sigma_3$ 时，永久变形测试结果可相差 10 倍以上。 σ_c 的大小也可以从侧面反映路基土静止土压力系数 K_0 的大小，即 K_0 越小，相同深度处的 σ_c 越大。现有规范取 $\sigma_c = 0.2\sigma_3$ ，一方面只能反映浅层应力状态，另一方面也只能代表 $K_0 = 0.83$ 一种情况。为了提升永久变形预估模型的适用范围，本规程与回弹模量预估模型类似，在预估模型中区分了偏应力的动静来源。

此外，和回弹模量预估模型研究类似，本规程并未在公式中纳入基质吸力，可认为基质吸力的影响暗含在拟合模型参数之中。

5.3 路基结构永久变形计算

5.3.2 传统不区分偏应力动静来源的永久变形计算方法同样采用分层总和法，但存在以下缺陷：随着路基深度增加，计算偏应力越来越大，计算得到的分层变形也越来越大，因此需要划分路基工作区来中断计算。本规程采用的计算方法区分了偏应力的动静来源，不存在传统分层总和法越深处变形越大的问题。

路基内部动应力经验公式（式（E-4）、式（E-5））由编写组开展的三维移动荷载作用下多层层状弹性体系理论动力响应解析解计算整理获得，统计了路基顶面以下 0.0m~5.0m 深度范围内的应力状态。计算时随机生成了 400 组路面结构（覆盖 0.3~1.0m 的路面厚度及较大的模量范围），每组结构考虑 20km/h、40km/h、60km/h、80km/h、100km/h、120km/h 共 6 档车速，共计 2400 组工况。考虑到三维移动荷载计算实施难度大，本规程提供了经验公式简化计算，结合结果拟合了经验公式，整体预测相关系数达 0.88，以便于工程使用。

路面结构模量通常远高于路基模量，较大路面模量取值范围内路基应力的差别通常在 20%以内，因此公式中未将路面模量作为自变量，而是直接以路面结构总厚度作为自变量。

值得指出的是，与圆形均布荷载（式（E-9），式（E-10））相比，应用该公式计算的路基竖向应力衰减更慢，这是三维移动荷载和轴对称荷载在物理上的特性。研究表明，相较于轴对称荷载，三维移动荷载引起的路基竖向动应力衰减明显更慢，影响深度可达 4m 甚至更深。这一差异的核心原因在于移动荷载具有显著的动力效应，车辆行驶时持续向土体激发应力波，同时多轮轴产生的动应力在深层相互叠加，且移动速度越快，低频应力波成分越能穿透更远距离，从而延缓了应力随深度的衰减速率。而现有规范采用双圆均布荷载计算模式，容易低估路基内部应力水平。

5.4 路基结构永久变形控制标准

5.4.1 现行沥青路面设计通常认为，对于半刚性路面，路基几乎不存在永久变形；而对于柔性路面，只要控制住路基表面的压应变，即可认为路基处于安定范围，自然不存在较大变形的问题。但实际上在湿热地区，随着运营年限增加，路基整体湿化，常导致变形急剧增加，因此有必要对该指标进行验算。

本规程针对最主流的半刚性路面结构，从现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）无机结合料稳定层拉应力疲劳公式出发，以路面结构满足服役性能要求反推路基顶面变形容许值。计算的具体步骤如下：

1 编写组开展了大量计算，构建了包含路基永久变形、路面各结构厚度、路面各结构模量及拉应力的数据库。计算时设置了 400 组不同的路面结构类型，覆盖 0.3~1.0m 的厚度范围。进而拟合了基层层底拉应力及底基层层底拉应力关

于路基永久变形、路面各结构厚度、路面各结构模量的经验公式（式（说明 5-1）、式（说明 5-2））。该经验公式相关系数高达 0.99，能反映路面结构拉应力随路面结构本身及路基永久变形之间的关系。

$$\begin{aligned} \sigma_{subb} = & 5.9271 \times 10^{-7} \times (0.0451PD + 0.0282) \\ & \times (-0.0229E_{pave} + 0.0065) \times (-0.0209E_{base} + 0.0081) \\ & \times (0.0071E_{subb} + 0.0125) \times \exp(-0.0682H_{pave}) \\ & \times \exp(-0.0025H_{base}) \times \exp(-0.0123H_{subb}) \end{aligned} \quad (\text{说明 5-1})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{base} = & 2.6857 \times 10^{-6} \times (0.1079PD + 0.0333) \\ & \times (-0.0425E_{pave} + 0.0025) \times (-0.0383E_{base} + 0.0045) \\ & \times (0.0117E_{subb} + 0.0148) \times H_{pave}^{-0.3872} \\ & \times H_{base}^{-0.2012} \times H_{subb}^{-0.8171} \end{aligned} \quad (\text{说明 5-2})$$

式中： σ_{subb} 、 σ_{base} ——分别为底基层、基层层底拉应力最大值（MPa）；

PD ——路基永久变形（mm）；

E_{pave} 、 E_{base} 、 E_{subb} ——分别为面层、基层、底基层的材料模量（MPa）；

H_{pave} 、 H_{base} 、 H_{subb} ——分别为面层、基层、底基层的厚度（cm）。

2 对式（说明 5-1）、式（说明 5-2）移项并整理为关于路基永久变形的方程，将 σ_{subb} 和 σ_{base} 替换为疲劳极限下的容许拉应力，即可获得路基永久变形上限 $[PD_{max}]$ ，即正文式（5-2）和正文式（5-3）。

此外，除层底拉应力指标外，现行规范对于半刚性基层沥青路面还有沥青混合料层永久变形量这一指标。沥青混合料层永久变形量主要取决于沥青混合料自身的材料强度和所处环境的荷载条件，与路基永久变形之间并无显著的相关关系，因此不作为判定依据。

5.4.2 对于柔性路面结构，规范还有沥青混合料层层底拉应变这一指标。实际上，沥青层的模量受温度影响较大，本身应变与设计值出入较大；此外，沥青具有流变性，会逐步适应路基变形，路基长期缓慢变形并不会在沥青层内积累拉应变。现行规范的拉应变指标实际上是验算单次循环荷载所产生的拉应变，故本规程未采用该指标反推路基永久变形控制标准，而是参照 AASHTO 标准结合我国实际交通轴载等级换算而来。

在美国 AASHTO 规范中, 柔性路面结构整体永久变形控制标准取 19mm, 而沥青层结构变形控制标准为 6mm, 因此可以推算路基的永久变形控制标准为 13mm。但 AASHTO 的设计标准轴载为 80kN, 因此需要进行换算, 步骤如下:

美国 AASHTO 规范中, 基层、底基层、路基的永久变形采用 Tseng-Lytton 修正模型:

$$\delta_i = k_s \varepsilon_v \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N} \right)^\beta} h_i \quad (\text{说明 5-3})$$

式中, k_s ——含水率和土性修正参数;

ε_0 , β , ρ ——土性相关参数;

ε_v ——子层平均垂直体积应变, 由结构响应模型计算得出;

ε_r ——回弹应变;

N ——累计轴载次数;

h_i ——计算层厚。

对于给定的材料、结构、轴次, 可简化为下式。即永久变形与竖向回弹应变成正比。

$$\delta \propto \varepsilon_v \quad (\text{说明 5-4})$$

在多层弹性体系下, 路基顶面竖向回弹应变与轴载呈线性关系, 因此:

$$\delta \propto P \quad (\text{说明 5-5})$$

式中, P ——轴载大小。

相同轴次下, 100 kN 产生的永久变形是 80 kN 的 1.25 倍。如果在中国 100 kN 体系下要保持相同的竖向应变, 由于 100 kN 产生的应变是 80 kN 的 1.25 倍, 允许变形应相应缩小, 为 $13 \times 0.8 = 10.4$ mm, 向下取整后为 10.0 mm。因此对于柔性路面结构, 本规程取 10.0 mm 作为路基永久变形控制标准。

此外, 对于水泥路面结构。水泥混凝土路面模量大、荷载扩散能力强, 板体将行车荷载分散作用于大范围路基顶面, 路基顶面行车荷载附加应力水平显著低于沥青路面; 同时, 板体对路基顶面均匀变形具有桥接作用, 均匀沉降并不直接引起路面结构损坏。水泥混凝土路面的损坏主要源于板底支承条件的局部劣化: 路基顶面在板角及接缝下方的累积永久变形引起板底脱空, 导致板角

荷载应力增大与接缝两侧差异沉降累积，最终表现为错台、唧泥及角隅断裂。因此，与沥青路面以车辙为锚定指标不同，水泥混凝土路面结构下路基永久变形控制标准以错台作为锚定指标。现行水泥混凝土路面养护规范以错台 5mm 作为处治阈值。本规程参照该阈值，取错台容许值 $[F] = 5\text{mm}$ 作为反推起点。

错台由两部分组成：一是板体反复挠曲动水作用下板下细料流失形成的材料亏空，二是路基顶面在行车荷载反复作用下的累积永久变形。前者由路面排水设计与基层抗冲刷设计另行控制，不占本标准额度；后者即为本规程控制的路基结构永久变形。为简化计算，将容许错台全部归因于路基顶面永久变形，与“整体变形 19mm 扣除沥青层变形 6mm、余值 13mm 全部归于路基”的归因方式一致。

在弹性地基板体系下，板角挠度与轴载大小成正比，错台累积速率与板角挠度水平正相关，因此错台累积量可认为与轴载成正比：

$$F \propto P \quad (\text{说明 5-6})$$

式中： F ——错台累积量（mm）。

美国 AASHTO 体系的设计标准轴载为 80kN，我国为 100kN。相同轴次下，100kN 产生的板角挠度及错台累积速率是 80kN 的 1.25 倍。为在 100kN 设计体系下保持相同的容许错台水平，路基永久变形控制标准应相应缩小。由此确定水泥混凝土路面结构路基永久变形控制标准取 $5 \times 0.8 = 4.0\text{mm}$ 。

总体上永久变形控制标准随着路面模量增加呈现下降趋势，与刚性板对支承条件劣化更敏感、沥青层对路基变形直接响应的力学机制一致。

5.5 变形施工分层检验标准

5.5.2 现有测试方法中，并无针对路基结构永久变形的测试验收指标、方法及设备。因此本规程推荐采用本规程第 8 章路基综合性能原位测试装备，该装备能同时施加动载和静载组合，并能实现大周期循环加载。结构变形计算流程始终为分层总和法，关键在于各亚层应力水平确定较设计时有所不同。

对于结构变形计算中各亚层应力状态计算，以计算应力状态与实际服役条件相一致为基本原则。对于施工检验标准计算，采用圆形均布荷载作用下弹性半空间荷载中心沿深度方向的解析解。

6 路基改善层设计

6.1 一般规定

6.1.1~6.1.2 路基改善层在之前规范中又叫做刚度补偿层，目的是提升路基整体服役水平。现行《公路路基设计规范》（JTG D30）并未就改善层做具体要求，本规程对此进行了系统补充，涵盖改善层厚度设计、施工验收及厚度变更等内容。

6.2 改善层厚度设计

6.2.3 由于改善层材料优于路基土，其测得的模量通常更大，增加改善层厚度有助于抬升路床顶面模量。此外，改善层材料通常为砂、砂土或碎石类材料，本身渗透系数较大、受湿度影响小，可认为运营期性能不存在衰减，按施工质量含水率制样即可。

式（F-8）由正文式（4-4）经过改写后获得，关键在于将改善层厚度视为路面结构厚度一部分。

式（F-10）为双层层状弹性体系综合等效模量的简化公式，具体推导如下。根据 Burmister 层状弹性体系理论，在圆形均布荷载（半径 a 、压力 q ）作用下，双层体系表面中心挠度 w_0 的严格解可表示为 Hankel 积分形式：

$$w_0 = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E_1} \int_0^\infty \frac{J_1(\xi a)}{\xi} \Phi(\xi, E_1, E_2, h_0) d\xi \quad (\text{说明 6-1})$$

式中： Φ ——与层间接触条件、模量比 E_1/E_2 及相对厚度 h_0/a 相关的传递函数。

上式无解析闭式解，需借助数值方法求解。将双层体系在表面中心产生的挠度 w_0 与均质弹性半空间在相同荷载条件下的挠度 w_{hom} 进行等效，定义等效模量满足：

$$w_0 = w_{hom} = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E_{eq}} \quad (\text{说明 6-2})$$

基于 Burmister 严格解，对模量比 E_1/E_2 （取 1~100）、相对厚度 h_0/a （取 0.1~10）进行大范围参数组合的数值积分计算，得到无量纲弯沉系数 $F = w_0 E_1 / [2(1-\nu^2)qa]$ 的系列计算结果。分析表明， F 随 h_0/a 的变化规律可用指数衰减函数良好描述，即：

$$F = \frac{E_1}{E_{eq}} = 1 + \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right) \exp \left(-\alpha \frac{h_0}{a} \right) \quad (\text{说明 6-3})$$

经非线性回归拟合，圆形均布荷载（柔性承载板）条件下形状系数 α 取 0.9~1.0，刚性板条件下形状系数 α 取 1.1~1.2，整理后即得式（F-10）。

6.2.4 由于改善层材料优于路基土，其测得的变形通常更大，增加改善层厚度有助于降低路床顶面永久变形。此外，改善层材料通常为砂、砂土或碎石类材料，本身渗透系数较大、受湿度影响小，可认为运营期性能不存在衰减，按施工质量含水率制样即可。

6.2.5 由于三级公路（粗粒土路基）及四级公路既没有开展回弹模量试验，也没有开展永久变形试验，缺乏路基参数，无法按照 6.2.3 条和 6.2.4 条开展改善层厚度设计，因此采用试验段来确定改善层厚度。改善层厚度确定时以 4.4.3 条计算的验收模量作为目标值。

6.3 改善层施工验收标准

6.3.2 由于改善层材料通常为碎石类填料，具有显著的应力敏感性，因此不同模量测试方法验收值各有不同。无法像 4.4.2 条采用统一的模量检验标准。计算时应根据不同测试方法分别计算校验标准，具体示例见附录 F.3。

6.3.3 对于变形验收，推荐采用本规程路基综合性能原位测试装备，计算时应力模式应与路基综合性能原位测试装备保持一致。

6.4 改善层厚度变更

6.4.2 本规程要求在路堤顶面进行一次模量和变形检验，在不满足计算的施工检验标准时，需及时进行干预。具体为增设改善层或调整改善层厚度，以此来确保路基施工完成后路基整体能满足设计要求。这里需要说明的是，此时路床尚未开始填筑，因此路床参数和改善层参数沿用改善层设计时的参数，只对路堤回弹模量和永久变形模型参数进行修正，设计的具体流程与 6.2 节一致，主要目的也是通过调整改善层厚度使得改善层顶面模量和变形均满足验收标准。

7 施工

7.1 一般规定

7.1.4 湿热地区降雨频繁、空气湿度较大，填料摊铺后长时间暴露容易吸水增湿。已经调节至施工质量含水率控制范围内的填料，可能因降雨重新超出控制范围，并出现表面冲刷、局部积水和下承层软化。因此，施工组织应尽量缩短填料摊铺至压实完成的时间，并通过合理划分作业段、设置临时排水和采取防雨措施，减少降雨对填筑层质量的影响。

7.2 湿度施工控制

7.2.3~7.2.4 碾压前检测质量含水率，主要用于判定填料是否满足碾压的含水率条件，避免在质量含水率超出施工控制范围时进行碾压而影响压实质量。

7.2.5 湿热地区降雨后，填筑层含水率和表面状态可能在短时间内发生明显变化，因此恢复施工前应重新检测质量含水率，并检查积水、冲刷、松散、软化和泥泞等情况。质量含水率或施工面状态不符合要求时，不宜直接通过增加碾压遍数处理，应先进行调湿、排水、翻松晾晒或换填等处理，复检合格后再继续施工。

7.3 模量与变形施工控制

7.3.1~7.3.2 模量和行车荷载永久变形检测设置在路堤顶面、路床顶面、改善层顶面关键控制面。路堤顶面检测用于掌握路堤实际性能，为改善层调整提供依据；路床顶面检测用于评价路基施工完成后的性能是否达到本规程第 4 章、第 5 章、第 6 章规定的控制要求。

7.3.4 模量或行车荷载永久变形不满足控制要求，可能由含水率偏高、压实不足、填料变化、实际填筑层厚度偏大或下承层软弱等多种原因引起。因此，检测不合格后应先分析原因和确定影响范围，再有针对性地采取调湿、补压、翻挖重填、换填或改善层调整等措施，处理后重新检测。仅进行局部重复检测而不处理导致性能不足的原因，不能保证路基长期耐久性。

7.4 改善层施工控制

7.4.3 路堤顶面实测性能与设计采用参数存在差异时，可按第 6.4 节进行改善层厚度变更。由于路基顶面标高已经由路线纵断面和路面结构设计确定，增加改善层厚度时不宜直接抬高路基顶面，而应相应调整路床填料厚度或结构组合。厚度变更段与相邻路段应平顺衔接，避免形成刚度和厚度突变。

征求意见稿

8 质量检验与验收

8.1 一般规定

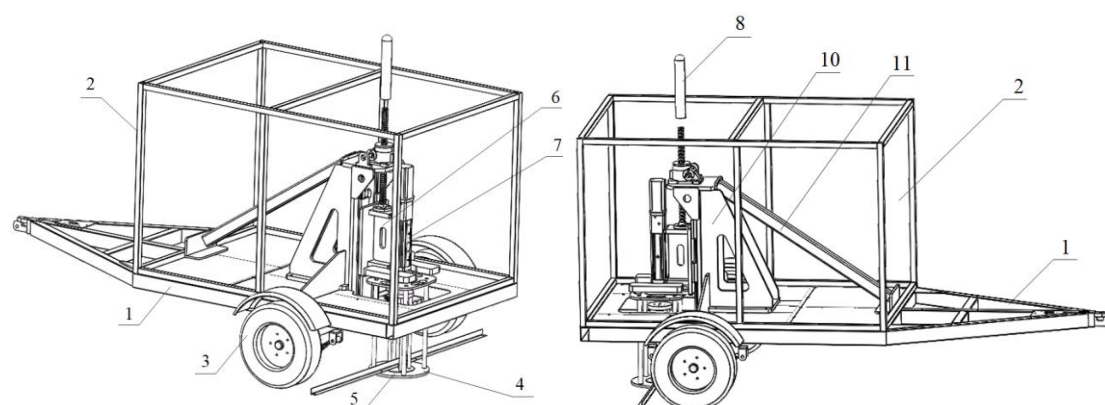
8.1.1 含水率和压实度已有成熟的行业标准测试、施工控制和验收体系。压实度测试是目前工程上评价施工质量应用最为广泛的方式，本规程继承这一想法，在传统规范基础上，增加模量和变形的检验。

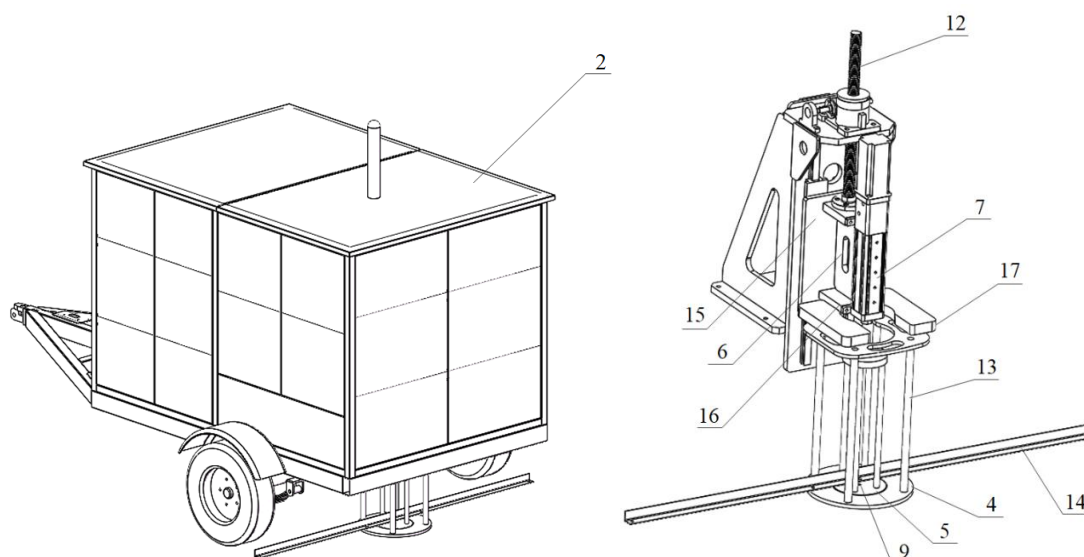
8.1.2 结构模量可采用承载板、FWD、PFWD 方法直接测试，但宜采用编写组自主研发的原位测试设备开展。

8.1.3 现行规范中并未将永久变形作为设计指标，亦没有相关的测试规程。永久变形作为本规程核心的设计指标，涵盖设计、施工、检测多个环节。因此本规程推荐采用原位测试设备进行永久变形的检验。

8.1.4 路基综合性能原位测试装备由编写组自行研制，包括由自锁式反力与调平机构、直径 200 mm 内圆动载板、外径 400 mm 静载外环、电动伺服加载系统、独立位移测量基准、多通道同步采集系统和数据处理终端。其中内外环加载板底部均布设橡胶垫，以实现均布荷载施加。内圆板模拟行车动载，外环模拟路面结构自重及约束，二者同心且底面齐平，具体参数见表 8-1。

设备测试时，通过内环循环模拟行车荷载，通过外环静载模拟路面约束和自重，通过动静载组合加载来获取路基土回弹模量和永久变形非线性特征，并配合内置的反演算法实现回弹模量模型参数和永久变形模型参数反演计算，能实现从力学响应挖掘力学本质，该装置已在实际路基工程开展了一系列测试。





- 1.车架, 2.箱体, 3.车轮, 4.静载加载盘(底部橡胶垫), 5.动载加载盘(底部橡胶垫)
6.立柱, 7.电缸, 8.保护套, 9.小孔, 10.倒三角加强筋, 11.支撑梁, 12.梯形丝杆
13.支撑柱, 14.测量杆, 15.横梁, 16.底座, 17.砝码。

图 8-1 轻便型多性能智能原位测试设备原型

表 8-1 路基结构模量测试设备主要技术参数

项目	参数	要求
加载板	内圆板直径 200 mm; 静载外环外径 400 mm	同心、底面齐平
作动器	额定推力不小于 4 kN; 行程不小于 100 mm	稳定复现定型荷载波形
力传感器	量程范围 0~5kN 示值误差不大于 $\pm 0.5\%FS$	计算采用实测荷载
位移传感器	示值误差不大于 $\pm 0.5\%FS$	采用独立位移基准
数据采集	采样频率不低于 100 Hz 示值误差不大于 $\pm 0.5\mu m$	荷载与位移同步

8.2 路基结构模量测试

8.2.2 传统方法在各自规定的加载条件下直接得到结构模量，在获取了回弹弯沉基础上通常采用峰值法（式（G-1））计算模量：

8.2.3 回弹模量模型参数反演算法由正演模型和反演算法两部分组成。正演模型采用基于物理信息神经网络实现，反演基于粒子群算法，以不同应力状态下回弹弯沉一致性为原则进行参数搜索。物理信息神经网络能实现给定路基回弹模量模型参数及应力状态下回弹弯沉的快速预测，训练依托编写组构建的 10 万规模样本库。整套反演算法为所研发路基综合性能原位测试装置内置算法。

编写组曾基于室内综合足尺试验平台对回弹模量模型参数反演开展了精度评价。首先采用原位设备于平台开展参数反演，再结合理论计算测试应力状态下回弹弯沉并按峰值法计算当量模量，进而与实测应力状态下当量模量进行比较。如图 8-2 所示，模拟结果和实测结果相关系数达到 0.945，说明这一方法本身能准确获取路基土回弹模量参数。



图 8-2 路基足尺试验平台及加载布置

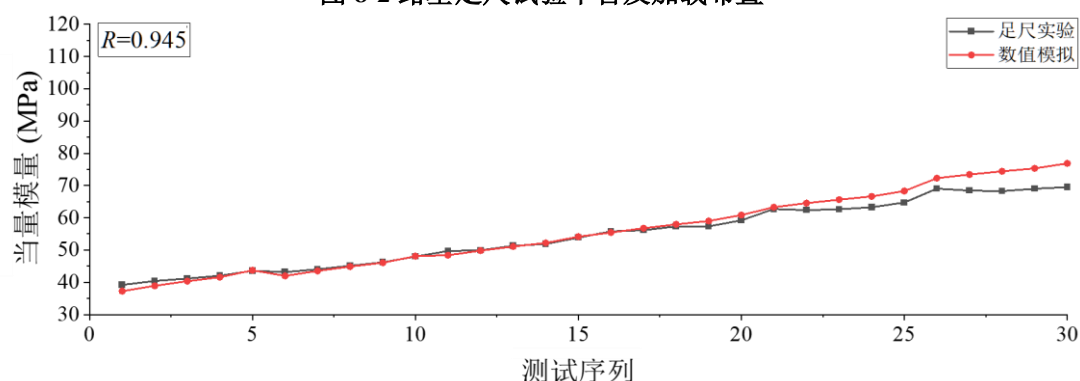


图 8-3 足尺试验模量实测结果与正演结果对比

当在改善层顶面检验模量时，由于改善层材料高度的荷载敏感性，无法找到合适的当量应力水平，承载板、FWD、PFWD 方法测试结果均具有较大差异。

各方法在测得回弹弯沉基础上，应直接采用峰值法（式（G-1））直接计算当量模量，并基于第 6 章中模量检验标准来完成验收，体现了本规程中回弹模量应力相关的核心特色。

8.3 路基结构永久变形测试

8.3.1 永久变形加载会改变测点的塑性历史，因而检测点和参数反演点均应独立。参数反演的 6 个点需处于同一路基施工段中。

8.3.2 考虑到变形越小测试误差越大，因此进行结构变形检验时，采用路基综合性能原位测试装备施加最大静载和最大荷载，即 25 kPa 的静压力和 100 kPa 循环应力。为获取循环荷载下的变形，首先应施加 30 min 静压用于使接触压密和短时蠕变趋于稳定，清零后连续加载 10000 次。

8.3.3 永久变形模型参数反演算法由正演模型和反演算法两部分组成。正演模型基于第 5 章构建的分层总和法，反演基于粒子群算法，以不同应力状态及不同加载周期永久变形一致性为原则进行参数搜索。该算法为编写组自行编制的算法，为所研发路基综合性能原位测试装置内置算法。同样，采用搭建的室内足尺综合试验平台对永久变形参数反演开展验证。于表面选取 6 个测点反演永久变形模型参数，进而设置了四种地下水位高度，开展了永久变形实测。结果如图 8-4 所示，计算结果与实测结果基本一致，表明永久变形模型参数反演方法能实现永久变形参数的精确获取。

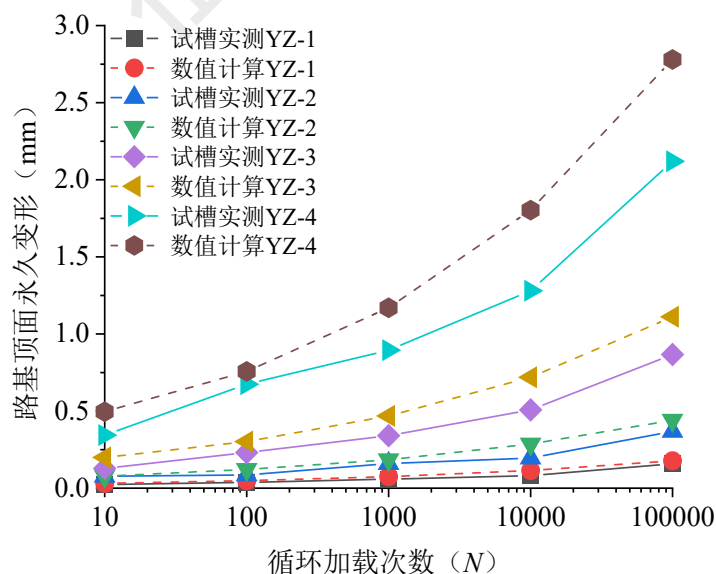


图 8-4 足尺试验变形实测结果与正演结果对比

本标准用词用语说明

1 本标准执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。

3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应符合本标准第×.×.×条的有关规定”或“应按本标准第×.×.×条的有关规定执行”。