

中国工程建设标准化协会标准（CECS G）

《公路寿命逐层递增式耐久性沥青路面
设计标准》制订

征求意见稿

长沙理工大学

交通运输部公路科学研究院

中交第一公路勘察设计研究院

内蒙古自治区交通建设工程质量监督局

河南省交通规划设计研究院股份有限公司

湖南省怀芷高速公路建设开发有限公司

保利长大公路工程有限公司

深圳市市政工程总公司

二〇二一年十月

目 录

1 总则.....	1
2 术语及符号.....	3
2.1 术语.....	3
2.2 符号.....	4
3 设计标准.....	7
4 结构组合设计.....	10
4.1 一般规定.....	10
4.2 路面结构组合.....	10
4.3 路基.....	11
4.4 刚度过渡层.....	11
4.5 基层.....	12
4.6 面层.....	12
4.7 功能层.....	12
4.8 路肩.....	13
4.9 路面排水.....	13
5 材料性质要求和设计参数.....	14
5.1 一般规定.....	14
5.2 路基土.....	14
5.3 粒料类材料.....	16
5.4 无机结合料稳定类材料.....	17
5.5 沥青结合料类材料.....	19
5.6 泊松比.....	25
6 路面结构设计.....	26
6.1 一般规定.....	26
6.2 设计指标.....	26
6.3 交通、材料和环境参数.....	28
6.4 路面结构验算流程.....	28

6.5 疲劳开裂验算.....	30
6.6 其它指标验算.....	32
附录 A 路面材料模量参数试验方法.....	33
附录 B 路面材料强度参数试验方法.....	50
附录 C 路面材料疲劳参数试验方法.....	75
附录 D 路基回弹模量标准试验方法.....	82
附录 E 路基回弹模量取值表.....	85
附录 F 刚度过渡层设计表及诺模图.....	86
附录 G 粒料类材料回弹模量试验方法.....	97
附录 H 路面结构验算方法.....	103
H.1 路面结构验算软件.....	103
H.2 路面结构验算算例.....	103
算例一.....	103
H.2.1 交通参数.....	103
H.2.2 环境参数.....	104
H.2.3 路面结构组合及材料参数.....	105
H.2.4 路面结构验算.....	105
算例二.....	124
H.2.1 交通参数.....	124
H.2.2 环境参数.....	125
H.2.3 路面结构组合及材料参数.....	125
H.2.4 路面结构验算.....	126

《公路寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计标准》逐条制订内容如下，包括每个一级或二级目录的条文内容和工作内容。该标准制订过程中，编制组将针对专家提出的建议和行业反映的相关问题对其进行修改和完善。

1 总则

1.0.1 为适应我国对公路交通基础设施耐久性的需要，提高沥青路面的设计质量和使用寿命，制订本标准。

1.0.2 本标准适用于各等级公路新建沥青路面设计，专用公路可参考执行。

1.0.3 设计内容：寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计包括路面各结构层设计使用年限的确定、设计参数的测试与确定、结构组合、材料设计和厚度设计，通过技术经济比较分析选定路面设计方案。

1.0.4 力学模型与设计理论：寿命逐层递增式耐久性沥青路面结构设计采用双圆垂直均布荷载作用下的弹性半空间层状连续体系力学模型，以双模量非线性弹性本构理论进行荷载响应分析计算，以三维应力状态下的强度与疲劳归一化模型确定结构抗力。

条文说明

本标准考虑路面材料抗压模量和抗拉模量的差异性，采用双模量弹性层状体系理论进行路面结构验算，材料双模量本构模型以拉、压回弹模量以及拉、压泊松比为模型参数，参数取值须满足 $R = E_T / \mu_T = E_C / \mu_C$ 的比例关系。三维应力状态下的强度模型考虑了三个主应力分量对路面结构和材料的协同破坏作用，模型参数可由直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸三种常规强度试验确定。三维应力状态下的疲劳归一化模型实现了不同试验方法下疲劳性能的统一表征，全面表征了路面材料的黏弹性特征，科学揭示了三维应力状态下路面结构与材料的抗疲劳特性，且疲劳曲线通过强度破坏点，疲劳方程具有后延性。

1.0.5 破坏模式：寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计应控制沥青混合料层疲劳开裂损坏、无机结合料稳定层疲劳开裂损坏、沥青混合料层永久变形量以及季节性冻土地区的路面低温开裂。

1.0.6 设计指标与破坏准则：以有效应力作为沥青混合料层、无机结合料稳定层的疲劳耐久性设计指标，以有效应力小于等于各结构层设计年限内的容许

有效应力作为其疲劳破坏准则，沥青混合料层永久变形量、防冻层厚度、低温开裂指数等设计和验算指标及其破坏准则参照《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）执行。

1.0.7 路基应满足耐久性沥青路面对其回弹模量的要求，宜采用路基刚度补偿层顶面当量回弹模量作为弹性半空间体回弹模量进行路基路面综合设计，并确保服役期该回弹模量的鲁棒性。

1.0.8 寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计遵循以下原则：沥青路面各结构层设计使用年限从上至下逐层递增；全寿命周期设计理念；路基与路面设计一体化、材料与结构一体化、建设与养护一体化；资源节约、环境保护；积极稳妥地推广新技术、新设备、新材料、新工艺。

1.0.9 沙漠、膨胀土和盐渍土等特殊土地地区的路面设计，除应符合本标准的相关规定外，还应考虑地区的特殊性，结合当地经验和成果，采取相应的技术措施。

1.0.10 沥青路面设计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 术语及符号

2.1 术语

2.1.1 寿命逐层递增式耐久性沥青路面

结构层设计使用年限从上至下逐层递增的耐久性沥青路面。寿命逐层递增式耐久性沥青路面由耐久性面层、长寿命基层、永久性路基构成。高速公路、一级公路设计使用年限为 60 年，一般中面层的设计使用年限为上面层的 2 倍，下面层的设计使用年限为中面层的 2 倍，基层设计使用年限为下面层的 2 倍。

2.1.2 路面设计使用年限

在正常设计、施工、使用和养护条件下，根据结构层寿命逐层递增的寿命设计标准，基层不需结构性修复的预定使用年限为路面设计使用年限，在该设计使用年限内面层可进行适当次的修复养护（包括功能性修复和结构性修复）。

2.1.3 设计轴载

路面结构设计采用的计算轴载，路面设计时采用单轴双轮组轴载 100kN 作为标准轴载，以 BZZ-100 表示。

2.1.4 路基刚度补偿层

提高路基弹性半空间体回弹模量的结构层，一般采用无结合料粒料类材料、石灰或水泥处治的路基土等。

2.1.5 刚度过渡层

为减少基层层底的疲劳应力强度比，从而提高基层的疲劳寿命，在基层与路基之间设置的刚度介于基层与路基之间的结构层，一般采用无机结合料粒料类或低掺量无机结合料粒料类材料。

2.1.6 双模量

即材料的拉模量与压模量，针对路面材料的抗拉与抗压差异性，路面荷载响应计算时采用的刚度设计参数，指路面材料的抗拉回弹模量与抗压回弹模量。

2.1.7 拉、压泊松比

拉泊松比：是指材料在单向受拉时，横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值。压泊松比：是指材料在单向受压时，横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值。拉、压模量与拉、压泊松比满足 $E_t/\mu_t = E_c/\mu_c$ 比例关系。

2.1.8 第一应力不变量

荷载作用下路面结构内部任意一点三个主应力的代数和。

2.1.9 有效应力（应力强度）

三维应力状态下路面结构抗力的疲劳强度参数，表征结构中任意点位各应力张量对材料破坏的协同作用。

2.1.10 破坏包络面

材料破坏时的任意应力状态可用应力空间中的一个点唯一地表征，材料破坏时所有的应力状态可构成应力空间中的一个连续曲面，该曲面称为材料的破坏包络面。

2.1.11 拉、压子午线

拉子午线是破坏包络面上应力角等于 0° 的点在 $I_1 - \sigma_3$ 平面上所形成的曲线，压子午线是破坏包络面上应力角等于 60° 的点在 $I_1 - \sigma_3$ 平面上所形成的曲线。

2.1.12 三维应力疲劳方程

三维应力状态下路面材料疲劳方程的统一表征模型，其疲劳应力比以有效应力为指标并考虑路面材料的黏弹性特性而确定，路面材料疲劳方程曲线在双对数坐标系中为一直线，且经过强度破坏点 $(1, 1)$ 。

2.1.13 疲劳强度结构系数

考虑路面材料疲劳破坏特性的安全系数，即有效应力强度折减系数，根据三维应力状态下的统一疲劳方程，并考虑室内材料与室外足尺路面结构的差异性以及公路等级进行修正确定。

2.1.14 容许有效应力（路面结构疲劳抗力）

表征路面结构疲劳耐久性的指标，为路面结构内部任意一点的有效应力强度值与其对应应力状态下的疲劳强度结构系数的比值，即容许有效应力。

2.1.15 全域搜索法

路面结构验算时，对沥青混合料层有效应力和无机结合料稳定层有效应力设计指标，在其对应的结构层内采用全域搜索的方法取最大力学响应量。

其它术语参考《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）和《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）。

2.2 符号

为了统一公路寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计指标与材料参数等特

定表达符号，除了现有设计规范中所涉及的术语，本标准将提出新增的与术语相对应的专用符号。

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——第一主应力、第二主应力和第三主应力

I_1 ——第一应力不变量， $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

σ_e ——有效应力， $\sigma_e = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}/\sqrt{2}$

$[\sigma_e]$ ——容许有效应力， $[\sigma_e] = [\sigma_e(\theta)]/K_S$

$\sigma_e(\theta)$ ——与设计点位三向应力工作条件相对应破坏状态下的三维强度，

$$\sigma_e(\theta) = \sigma_e^t - (\sigma_e^t - \sigma_e^c)3\theta/\pi$$

σ_e^t ——拉子午线上的极限应力， $\sigma_e^t/S_c = a - b(I_1/S_c)$

σ_e^c ——压子午线上的极限应力， $\sigma_e^c/S_c = m[a - b(I_1/S_c)]$

θ ——罗德角， $\cos\theta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}}$

S_t ——直接拉伸强度

S_c ——单轴压缩强度

S_{it} ——间接拉伸强度

a 、 b 、 m ——三维强度模型参数

K_S ——疲劳强度结构系数， $K_S = k_1(1/\Delta) = (k_1^\gamma N_f)^{1/\gamma}$

k_1 ——室内外疲劳寿命修正系数；

N_f ——疲劳寿命， $N_f = (\Delta)^{-\gamma} = (\sigma_e/\sigma_e(\theta))^{-\gamma}$

Δ ——三维应力状态下疲劳试验应力比， $\Delta = \sigma_e/\sigma_e(\theta)$

γ ——三维应力状态下的疲劳方程参数

R ——弹性常数

E_t ——抗拉模量

E_c ——抗压模量

μ_t ——拉泊松比

μ_c ——压泊松比

其它符号参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)和《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)。

征求意见稿

3 设计标准

3.0.1 沥青路面结构的目标可靠度和目标可靠指标不应低于表3.0.1的规定。

表 3.0.1 目标可靠度和目标可靠指标

公路等级	高速公路	一级公路
目标可靠度 (%)	95	90
目标可靠度指标 β	1.65	1.28

3.0.2 沥青路面各层结构设计使用年限不应低于表 3.0.1 的规定，应根据公路等级、经济、交通荷载等级等因素综合确定。

表 3.0.2 寿命逐层递增式耐久性沥青路面结构设计使用年限 (年)

结构层位		高速公路、一级公路
耐久性面层	上面层	15
	中面层	15
	下面层	30
长寿命基层	基层	60
永久性路基	刚度过渡层	>100
	土基	

条文说明

沥青路面各结构层设计使用年限从上至下逐层递增，各等级公路的上面层可在其设计使用年限内进行一次功能性修复养护。

3.0.3 路面设计应采用轴重为100kN的单轴-双轮组轴载作为设计轴载，计算参数按表3.0.3确定。

表 3.0.3 设计轴载的参数

设计轴载 (KN)	轮胎接地压强 (MPa)	单轮接地当量圆直径 (mm)	两轮中心距 (mm)
100	0.70	213.0	319.5

3.0.4 路面结构所承受的交通荷载应按表3.0.4进行分级。

表 3.0.4 设计交通荷载等级

设计交通荷载等级	极重	特重	重	中等	轻
上面层设计使用年限内设计车道累计大型客车和货车交通量 ($\times 10^6$, 辆)	≥ 50.0	50.0~19.0	19.0~8.0	8.0~4.0	<4.0

注：大型客车和货车为《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录A中表A.1.2所列的2类~11类车。

条文说明

在《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）交通荷载等级划分的基础上，以上面层进行第一次专项养护时所对应的设计年限内设计车道累计大型客车和货车交通量为依据，将交通荷载等级划分为上述5个等级。

3.0.5 路面使用性能设计指标应满足下列要求

1 沥青混合料层与无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命，均不应小于根据《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录A和本标准表3.0.2所确定的各结构层设计使用年限内当量设计轴载累计作用次数。

2 按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录B.3计算的沥青混合料层永久变形量不应大于表3.0.5-1所列容许永久变形量。

表 3.0.5-1 沥青混合料层容许永久变形量 (mm)

基层类型	沥青混合料层容许永久变形量
	高速、一级公路
无机结合料稳定类基层为无机结合料稳定类的沥青混合料基层	15
其它基层	10

3 按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录B.5计算的季节性冻土地区沥青面层低温开裂指数不宜大于表3.0.5-2所列数值。

表 3.0.5-2 低温开裂指数要求

公路等级	高速、一级公路
低温开裂指数CI, 不大于	3

注：低温开裂指数CI—竣工验收时100m调查单元内横向裂缝条数，贯穿全幅的裂缝按1条计，未贯穿且长度超过一个车道宽度的裂缝按0.5条计，不超过一个车道宽度的裂缝不计入。

3.0.6 高速公路、一级公路路面在交工验收时其抗滑技术指标应满足表3.0.6的技术要求。

表 3.0.6 抗滑技术要求

年平均降雨量 (mm)	交工检测指标值	
	横向力系数 SFC_{60}^a	构造深度 TD^b (mm)
>1000	≥54	≥0.55
500~1000	≥50	≥0.50
250~500	≥45	≥0.45

注：a横向力系数 SFC_{60} —用横向力系数测试车，在60km/h±1km/h车速下测定。

b构造深度 TD —用铺砂法测定。

征求意见稿

4 结构组合设计

4.1 一般规定

4.1.1 寿命逐层递增式耐久性沥青路面结构组合设计的目的是指通过合理的结构组合，使得沥青路面各结构层的服役应力状态与各结构层材料的力学特性、功能特性相匹配，从而更好的发挥各结构层材料的性能，达到提高沥青路面耐久性的目的。

4.1.2 结构组合设计的内容包括结构组合形式、各结构层的厚度及各结构层的材料设计和技术要求。

4.1.3 应根据不同的结构形式及各结构层在路面整体结构中起到的作用和应力状态，选择与各结构层相适应的材料类型和技术指标。

4.1.4 路面结构可由面层、基层、刚度过渡层和必要的功能层组成。

4.1.5 在各结构层的设计使用年限内，路面各结构层均不应发生疲劳破坏。在上一结构层出现疲劳破坏之前，应避免下一结构层出现疲劳破坏，且各结构层的使用年限应满足寿命逐层递增的要求。

4.1.6 应采取适宜措施，使得沥青结合类材料层之间，沥青结合类材料层和其它材料层之间结合紧密，在设计使用年限内不发生层间分离。

4.1.7 应采取路面结构的防水、排水措施，阻止降水渗入路面结构层内部。

条文说明

材料设计和结构设计相辅相成，材料设计不能和结构设计相脱离，结构耐久性需要适宜的材料来实现。应根据不同结构或相同结构中不同层位的技术要求，进行专项的材料设计，这是实现耐久性路面结构设计的关键。

取消底基层，半刚性基层的各层按统一的强度与模量标准进行设计。

4.2 路面结构组合

4.2.1 路面结构类型的选择应根据交通荷载等级、路基状况和材料供应等因素，并结合路面的材料特性和结构特性共同选取。

4.2.2 寿命逐层递增式耐久性沥青路面结构类型推荐采用无机结合料稳定类基层沥青路面。

4.2.3 无机结合料稳定类基层沥青路面适用于各种交通等级。

4.2.4 路面各结构层的抗压模量比应在适宜范围内，基层与沥青面层的抗压

模量比宜在 1.2~2.5 之间，通过设置路基刚度补偿层和刚度过渡层，并进行技术经济比较，宜使基层与下承层弹性半空间体的抗压模量比在 20.0~50.0 之间。

4.2.5 采用无机结合料稳定类基层时，应采取适宜措施减少基层收缩裂缝和路面的反射裂缝。

4.3 路基

4.3.1 路基的总体要求应满足本标准所提的永久性路基的设计标准。

4.3.2 路基应稳定、密实和均匀，并具有足够的承载力。若路基承载能力不够，不能满足本标准所提出的寿命逐层递增式耐久性沥青路面对路基顶面回弹模量的要求时，需对路基进行专项设计，应设置路基刚度补偿层以提高路基的承载能力。刚度补偿层可为无结合料粒料类或低掺量无机结合料粒料类材料、石灰或水泥处治路基土等。

4.3.3 路基施工含水率应参考长期服役状态下的平衡湿度进行设计，以确保路基的承载能力及其鲁棒性。

条文说明

对于平衡湿度高于其塑限的土宜采用湿法击实，反之，则采用干法击实。

4.3.4 其它要求同《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)中路基部分和《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)。

条文说明

根据受力状况分析，提高路基模量将显著改善路面各结构层的受力状况，从而提高路面结构层的整体疲劳寿命，故提高路基模量是实现路面结构耐久性的重要途径。

刚度补偿层是指现场路基填料不能满足寿命逐层递增式耐久性路面对路基承载力的要求时，采用无结合料粒料类或低掺量无机结合料粒料类材料、石灰或水泥处治路基土等进行补强，刚度补偿层不进行疲劳破坏等结构验算。

4.4 刚度过渡层

当基层与路基之间的刚度比不满足本标准所提出的公路寿命逐层递增式耐久性沥青路面对路面结构刚度过渡之要求时，应设置无结合料粒料类或掺少量无机结合料的粒料类材料来满足刚度过渡要求。

条文说明

根据路面结构内部应力状况分析，路面各结构层之间模量的良好过渡是确保路面面层和基层耐久性的重要措施，针对目前常用的半刚性基层沥青路面基层模量大、路基模量小的现状，根据寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计需要，在基层和路基之间设置刚度过渡层，以实现基层和路基之间模量的合理过渡。研究表明：设置刚度过渡层后，可使基层与下承层之间的刚度差异性由250倍左右降至30倍左右。

4.5 基层

4.5.1 基层的总体要求应满足本标准所提的长寿命基层的设计标准。

4.5.2 基层应具有足够的承载能力、抗疲劳开裂性能、足够的耐久性和水稳定性。

4.5.3 水泥稳定类基层应采用骨架密实型级配，减少细集料的用量，以减少干缩开裂。

4.5.4 可通过采用持强增韧型水泥稳定碎石基层来提高其韧性与耐久性，同时实现基层模量可调可设计的功能。

4.5.5 其它要求同《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)中基层部分。

4.6 面层

4.6.1 面层的总体要求应满足本标准所提的耐久性面层的设计标准，且中、上面层和下面层的寿命应相协调。

4.6.2 面层采用不同材料铺筑时，可以分为上面层、中面层和下面层，上面层应具有平整、高温抗车辙和抗滑耐磨的功能；中、下面层应具有高温抗车辙、抗剪切、密实、基本不透水的性能；面层应具有优良的抗疲劳开裂的性能。

4.6.3 其它要求同《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)中面层部分。

4.7 功能层

4.7.1 功能层的设计应和当地自然环境、气候条件和路面结构层类型相匹配。

4.7.2 半刚性基层和沥青混凝土面层之间应设置同步碎石封层作为应力吸收层，应力吸收层集料的粒径应与下面层沥青混凝土的集料粒径相匹配。

4.7.3 刚度过渡层可兼具季节性冻土地区和地下水位高、排水不良路段的功能层的作用。

4.7.4 其它要求同《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)功能层部分。

4.8 路肩

4.8.1 路肩边部排水应做专项设计。

4.8.2 其它要求同《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)路肩部分。

4.9 路面排水

同《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)路面排水部分。

征求意见稿

5 材料性质要求和设计参数

5.1 一般规定

5.1.1 路面材料应根据公路等级、交通荷载等级、气候条件、各结构层功能要求和当地材料特性等，在技术经济论证基础上进行设计并确定材料设计参数。

5.1.2 各结构层的原材料性质要求和混合料组成与性质要求，应符合现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)和《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)的有关规定，并结合工程特点和当地经验确定。

5.1.3 路面结构层材料设计参数的确定可分为下列三个水平：

- 1 水平一，通过室内试验实测确定。
- 2 水平二，利用已有经验关系式确定。
- 3 水平三，参照典型数值确定。

5.1.4 高速公路和一级公路的施工图设计阶段宜采用水平一，其它设计阶段可采用水平二或水平三。

5.2 路基土

5.2.1 路基顶面回弹模量设计值 E_0 应按式 (5.2.1-1) 确定。

$$E_0 = K_s K_\eta M_R \quad (5.2.1-1)$$

式中： E_0 ——平衡湿度状态下路基回弹模量设计值 (MPa)；

M_R ——标准状态下路基动态回弹模量值 (MPa)，按本规范 5.2.2 条确定；

K_s ——路基回弹模量湿度调整系数，为平衡湿度 (含水率) 状态下的回弹模量与标准状态下的回弹模量之比，按本规范 5.2.3 条确定；

K_η ——干湿循环或冻融循环条件下路基土模量折减系数，通过试验确定。

初步设计时，非冰冻地区可根据土质类型、失水率确定，季节冻土可根据冻结温度、含水率确定，折减系数可取 0.7~0.95。非冰冻区粉质土、黏质土，失水率大于 30%，取小值，反之取大值；粗粒土取大值。季节性冻土地区粉质土、黏质土冻结温度低于 -15℃，冻前含水率高，取小值，反之取较大值；粗粒土取

大值。

条文说明

在《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）的基础上，本次规范修订，以最佳含水率和最大干密度作为路基标准状态。

5.2.2 标准状态下路基回弹模量值应按下列方法确定：

1 水平 1，按照附录 D 通过试验获得。

条文说明

在《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）的基础上，本次规范修订，最大粒径大于 9.5mm，且小于 19mm 的路基土与粒料，采用振动或冲击压实成型。

2 水平 2，按照式（5.2.2-1）、式（5.2.2-2）由路基填料的 CBR 值估算标准状态下路基回弹模量值：

$$M_R=17.6CBR^{0.64} \quad (2 < CBR \leq 12) \quad (5.2.2-1)$$

$$M_R=22.1CBR^{0.55} \quad (12 < CBR \leq 80) \quad (5.2.2-2)$$

3 水平 3，受试验条件限制时，可按照附录 E，根据土组类别查取回弹模量参考值。

5.2.3 新建公路路床应处于干燥或中湿状态。路基设计可按下列方法预估湿度状态，确定回弹模量湿度调整系数：

1 可按《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）附录 C 的有关规定，根据路基相对高度、路基土组类别及其毛细水上升高度，确定路基干湿类型，并预估路基结构的平衡湿度。

2 路基回弹模量湿度调整系数可按《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）附录 D 确定。

5.2.4 路基顶面回弹模量应符合表 5.2.4 的规定。不满足要求时，应采取改变填料、设置粒料类或无机结合料稳定类路基刚度补偿层等措施提高路基顶面回弹模量至满足要求。

表 5.2.4 路基顶面回弹模量（MPa）

交通荷载等级	极重	特重	重	中等、轻
回弹模量，不小于	70	60	50	40

条文说明

针对路基顶面模量值较低不能满足路面对路基刚度要求的问题，本标准采用路基刚度补偿设计方法，在路基顶面用压实后回弹模量较高且具有良好水稳性的填料（如砾石土、碎石土）填筑一层具有一定厚度的上覆层，使路基顶面的回弹模量达到路面设计要求。

5.2.5 其它规定应按照《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）和《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）实施。

5.3 粒料类材料

5.3.1 刚度过渡层、刚度补偿层用级配碎石的 CBR 值应符合表 5.3.1 的有关规定。

表 5.3.1 级配碎石 CBR 值

结构层	公路等级	极重、特重交通	重交通	中等、轻交通
刚度过渡层	高速公路、一级公路	≥200	≥180	≥160
刚度补偿层	高速公路、一级公路	≥120	≥100	≥80

5.3.2 级配砾石或天然砂砾用于刚度过渡层时，对极重、特重和重交通荷载等级，CBR 值不应小于 80；对中等交通荷载等级，CBR 值不应小于 60；对轻交通荷载等级，CBR 值不应小于 40。

5.3.3 高速公路和一级公路刚度过渡层粒料公称最大粒径不宜大于 26.5mm；刚度补偿层采用级配碎石或级配砂砾时，公称最大粒径不宜大于 31.5mm；刚度补偿层采用天然砂砾时，公称最大粒径不宜大于 53.0mm。

5.3.4 防冻层所用砂砾、碎石材料的最大粒径不应超过 53.0mm。

5.3.5 级配碎石和级配砂砾中通过 0.075mm 筛孔的颗粒含量不宜大于 5%，不满足要求时，可用天然砂替代部分细集料。

5.3.6 粒料层的回弹模量在结构验算时应采用粒料回弹模量乘以湿度调整系数后得到，湿度调整系数可在 1.6~2.0 范围内选取。粒料回弹模量应取用最佳含水率和与压实度要求相应的干密度条件下的试验值。压实度要求应符合《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20-2015）的有关规定。

5.3.7 最佳含水率和与压实度要求相应的干密度条件下的粒料回弹模量应按本规范第 5.1.4 条规定，依据相应的水平确定：

1 水平一，按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录 D 采用重复加载三轴压缩试验测定，取回弹模量试验结果的均值。

2 水平三，按粒料类型和层位参照表 5.3.7 确定粒料回弹模量取值。

表 5.3.7 粒料回弹模量取值范围 (MPa)

材料类型和层位	最佳含水率和与压实度要求 相应的干密度条件下 (室内材料试验模量)	经湿度调整后 (结构设计用模量)
级配碎石刚度过渡层	180~250	350~440
级配砾石刚度过渡层	170~220	240~380
未筛分碎石刚度补偿层	150~220	200~320
天然砂砾刚度补偿层	105~135	170~240

注：材料性能好、级配好或压实度大于99%时取高值，反之取低值。

5.3.8 刚度过渡层可按照附录 F 设计，顶面当量回弹模量应符合表 5.3.8 的规定

表 5.3.8 刚度过渡层顶面当量回弹模量 (MPa)

交通荷载等级	极重	特重	重	中等、轻
回弹模量，不小于	220	200	180	160

5.4 无机结合料稳定类材料

5.4.1 无机结合料稳定类材料用于高速公路、一级公路基层时，公称最大粒径不宜大于 31.5mm；用于高速公路和一级公路刚度过渡层时，公称最大粒径不宜大于 37.5mm。

5.4.2 水泥稳定类材料水泥剂量宜为 3.0%~6.0%，以采用振动拌合工艺为宜。
条文说明

振动拌合工艺已应用于 30 个省市 200 余个公路项目水稳类材料层的铺筑，室内试验及工程实践表明：采用振动拌合工艺的水泥稳定类材料水泥颗粒、水分子和细集料充分均匀弥散，其混合料更加均匀、和易性有效提升，水泥稳定材料的强度较设计强度上限提高 10%以上、变异系数控制在 10%以内。

5.4.3 无机结合料稳定类材料 7d 无侧限抗压强度代表值应符合表 5.4.3 要求。

表 5.4.3 无机结合料稳定类材料 7d 无侧限抗压强度标准（代表值）（MPa）

材料	结构层	公路等级	极重、特重交通	重交通	中等、轻交通
水泥稳定类	基层	高速公路、一级公路	5.0~7.0	4.0~6.0	3.0~5.0
	刚度过渡层	高速公路、一级公路	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0

5.4.4 沥青路面结构设计时应将抗拉模量、抗拉泊松比和抗压模量、抗压泊松比作为模量设计参数；以直接拉伸强度、单轴压缩强度、间接拉伸强度作为无机结合料稳定类材料结构层的强度设计参数。

无机结合料稳定类材料的抗拉、抗压回弹模量和直接拉伸强度、单轴压缩强度、间接拉伸强度应按本规范第 5.1.3 条规定，依据相应的水平确定：

1 水平一，按本规范附录 A 和附录 B，无机结合料稳定类材料的单轴压缩强度和抗压回弹模量应采用单轴压缩试验确定，直接拉伸强度和抗拉弹性模量采用直接拉伸试验确定，间接拉伸强度通过间接拉伸试验确定。模量测试时宜采用中间段法，强度和模量的测试应符合现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTG E51-2009）中的有关规定。测试时水泥稳定类材料试件的龄期应为 90d，强度和弹性模量应取用测试数据的平均值。

2 水平三，参照表 5.4.4 确定无机结合料稳定类材料的直接拉伸、单轴压缩强度和弹性模量。

表 5.4.4 无机结合料稳定类材料的抗拉、抗压强度和弹性模量取值范围（MPa）

材料	抗拉强度	抗压强度	间接拉伸强度	抗压模量	抗拉模量
水泥稳定粒料	0.8~1.5	7.0~13.0	0.75~1.4	18000~28000	6000~14000

注：结合料用量高、材料性能好、级配好或压实度大时取高值，反之取低值。

5.4.5 结构验算时，无机结合料稳定类材料弹性模量应乘以结构层模量调整系数 0.5。

条文说明：

“基于多指标的沥青路面结构设计方法研究”课题对比了无机结合料稳定类材料室内测试的弹性模量和采用落锤式弯沉仪 FWD 弯沉盆反算的结构层模量，前者约为后者的 2 倍，故引入模量调整系数，将室内弹性模量调整为路面结构层模量。

5.4.6 无机结合料稳定类材料的三维强度参数应按本标准 5.1.3 条规定，依

据相应的水平确定：

1 水平一，按本规范附录 B，采用直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸试验分别测定无机结合料稳定类材料的强度，按下式确定其三维强度模型：

$$\text{拉伸子午线： } \sigma_e^t / S_c = a - b(I_1 / S_c) \quad (5.4.6-1)$$

$$\text{压缩子午线： } \sigma_e^c / S_c = m [a - b(I_1 / S_c)] \quad (5.4.6-2)$$

$$\text{破坏包络线： } \sigma_e(\theta) = \sigma_e^t - (\sigma_e^t - \sigma_e^c) 3\theta / \pi \quad (5.4.6-3)$$

式中符号意义见术语及符号。

将直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸三组强度试验结果代入式 5.4.6-1、5.4.6-2、5.4.6-3 求得三维强度模型参数 a ， b ， m 。

2 水平三，参考表 5.4.4 无机结合料稳定类材料的直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸的强度推荐值，根据附录 B 的计算步骤获取三维强度模型参数 a ， b ， m 。

5.4.7 无机结合料稳定类材料的疲劳参数应通过直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸等试验方法确定三维应力状态下疲劳归一化模型及其参数。

1 水平一，根据附录 C，通过直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸等疲劳试验方法确定三维应力状态下疲劳归一化模型及其参数。

$$N_f = (\Delta)^{\gamma} \quad (5.4.7)$$

式中符号意义见术语及符号。

2 水平三，参考表 5.4.7 确定无机结合料稳定类材料的疲劳归一化方程参数。

表 5.4.7 无机结合料稳定类材料的疲劳归一化方程参数

材料	γ
水泥稳定类粒料	9.0~11.0

注：结合料用量高、材料性能好、级配好或压实度大时取高值，反之取低值。

5.4.8 无机结合料稳定类材料应在满足强度的前提下，尽量降低水泥剂量，且与沥青层及刚度过渡层的模量达到合理匹配。

5.4.9 其它规定根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) 实施。

5.5 沥青结合料类材料

5.5.1 沥青结合料应采用道路石油沥青或其加工产品，沥青类型应根据公路等级、气候条件、交通荷载等级、结构层位和施工条件等确定。

5.5.2 极重、特重和重交通荷载等级公路、气候条件严酷地区公路，以及连续长陡纵坡路段，中面层和表面层宜采取优化混合料级配、选用改性沥青或添加外掺剂等措施。

5.5.3 开级配沥青混合料表面层宜采用高黏沥青或橡胶沥青，并采用适量消石灰或水泥替代矿粉。

5.5.4 表面层沥青混合料公称最大粒径不宜大于 16.0mm，中面层和下面层沥青混合料公称最大粒径不宜小于 16.0mm，基层沥青碎石公称最大粒径不宜小于 26.5mm。

5.5.5 季节性冻土地区高速公路和一级公路表面层沥青低温性能宜满足下列指标要求：

1 分析连续 10 年年最低气温平均值，作为路面低温设计温度。路面低温设计温度提高 10℃ 的试验条件下，沥青弯曲梁流变试验蠕变劲度 S_t 不宜大于 300MPa，且蠕变曲线斜率 m 不宜大于 0.30。

2 当蠕变劲度 S_t 在 300~600MPa 范围内，且蠕变曲线斜率 m 大于 0.30 时，增加沥青直接拉伸试验，其断裂应变不宜小于 1%。

3 以上都不满足时，采用弯曲梁流变试验和直接拉伸试验确定沥青临界开裂温度，临界开裂温度不宜高于路面低温设计温度。

5.5.6 公称最大粒径不大于 19.0mm 的沥青混合料，宜在温度为 -10℃、加载速率为 50mm/min 条件下进行小梁弯曲试验。沥青混合料的破坏应变宜符合表 5.5.6 的规定。

表 5.5.6 沥青混合料低温弯曲试验破坏应变技术要求

气候条件与技术指标	相应于下列气候分区所要求的破坏应变 ($\mu\epsilon$)										试验方法
	< -37.0		-37.0 ~ -21.5			-21.5 ~ -9.0		> -9.0			
	1.冬严寒区		2.冬寒区			3.冬冷区		4.冬温区			
	1-1	2-1	1-2	2-2	3-2	1-3	2-3	1-4	2-4		
普通沥青混合料，不小于	2600		2300			2000					T 7015
改性沥青混合料，不小于	3000		2800			2500					

注：气候分区的确定应符合现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 的有关规定。

5.5.7 高速公路和一级公路沥青混合料应在规定的试验条件下进行车辙试验，并应符合表 5.5.7 的要求。

表 5.5.7 沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求（次/mm）

气候条件与技术指标		相应于以下气候分区所要求的动稳定度技术要求								试验方法	
七月平均最高气温（℃）及气候分区		> 30				20 ~ 30					< 20
		1.夏炎热区				2.夏热区					3.夏凉区
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-2	
普通沥青混合料，不小于		800		1000		600	800			600	
改性沥青混合料，不小于		2800		3200		2000	2400			1800	
SMA 混合料，不小于	普通沥青	1500								T 0719	
	改性沥青	3000									
OGFC 混合料，不小于		1500（中等、轻交通荷载等级）、3000（重及以上交通荷载等级）									

注：1. 气候分区的确定应符合现行《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40-2004）的有关规定。

2. 当其它月份的平均最高温度高于七月时，可使用该月平均最高温度。

3. 在特殊情况下，对钢桥面铺装、重载车特别多或纵坡较大的长距离上坡路段、厂砖专用道路，可酌情提高动稳定度要求。

4. 对炎热地区或特重及以上交通荷载等级公路，可根据气候条件和交通状况适当提高试验温度或增加试验荷载。

5.5.8 沥青路面结构设计时应将抗拉模量、抗拉泊松比和抗压模量、抗压泊松比作为模量设计参数；以直接拉伸强度、单轴压缩强度、间接拉伸强度作为沥青结合料类材料结构层的强度设计参数。

沥青结合料类材料的抗拉、抗压回弹模量和直接拉伸强度、单轴压缩强度、间接拉伸强度应按本规范第5.1.3条规定，依据相应的水平确定：

1 水平一，沥青混合料的直接拉伸强度和动态拉伸回弹模量应采用直接拉伸试验测定，单轴压缩强度和动态压缩回弹模量应采用无侧限抗压试验测定，间接拉伸强度应采用间接拉伸试验方法测定。模量测试时应采用中间段法，强度和模量的测试按附录 A 和附录 B 的试验方法取实测值，试验温度选用 15℃，面层沥青混合料的加载频率采用 10Hz。

2 水平三，参照表 5.5.8 确定沥青混合料直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸强

度及直接拉伸、单轴压缩动态回弹模量。

表 5.5.8-1 常用沥青混合料 15°C条件下直接拉伸强度取值范围 (MPa)

沥青混合料类型	沥青种类			
	70号道路石油沥青	90号道路石油沥青	110号道路石油沥青	SBS改性沥青
SMA10、SMA13、 SMA16	—	—	—	5.0~7.0
AC10、AC13	4.5~6.0	4.0~6.0	3.5~5.5	4.5~6.5
AC16、AC20、AC25	5.0~6.5	4.5~6.5	4.0~6.0	5.0~6.5
ATB25	3.5~5.5	—	—	—

表 5.5.8-2 常用沥青混合料 15°C条件下单轴压缩强度取值范围 (MPa)

沥青混合料类型	沥青种类			
	70号道路石油沥青	90号道路石油沥青	110号道路石油沥青	SBS改性沥青
SMA10、SMA13、 SMA16	—	—	—	24.0~32.5
AC10、AC13	22.0~29.0	19.5~28.5	17.5~27.0	23.0~31.0
AC16、AC20、AC25	23.0~31.0	22.0~30.0	19.5~29.0	24.0~32.0
ATB25	17.5~30.0	—	—	—

表 5.5.8-3 常用沥青混合料 15°C条件下动态拉伸模量取值范围 (MPa)

沥青混合料类型	沥青种类			
	70号道路石油沥青	90号道路石油沥青	110号道路石油沥青	SBS改性沥青
SMA10、SMA13、 SMA16	—	—	—	4500~7000
AC10、AC13	4500~7000	4500~7000	4000~6500	5000~7000
AC16、AC20、AC25	5000~8000	5000~7500	4500~7000	5000~8000
ATB25	4000~6500	—	—	—

表 5.5.8-4 常用沥青混合料 15°C条件下动态压缩模量取值范围 (MPa)

沥青混合料类型	沥青种类			
	70号道路石油沥青	90号道路石油沥青	110号道路石油沥青	SBS改性沥青
SMA10、SMA13、 SMA16	—	—	—	6000~11500
AC10、AC13	6500~11500	6000~11000	5500~10000	7000~12000
AC16、AC20、AC25	7500~13500	7000~12500	6000~11500	7500~13500

ATB25	5500~10500	—	—	—
-------	------------	---	---	---

注：1. ATB25 为 5Hz 条件下的动态拉、压模量，其它沥青混合料为 10Hz 条件下的动态拉、压模量，试验温度选用 15℃。

2. 沥青粘度大、级配好或孔隙率小时取高值，反之取低值。

表 5.5.8-5 常用沥青混合料 15℃条件下间接拉伸强度取值范围 (MPa)

沥青混合料类型	沥青种类			
	70 号道路石油沥青	90 号道路石油沥青	110 号道路石油沥青	SBS 改性沥青
SMA10、SMA13、 SMA16	—	—	—	3.5~5.0
AC10、AC13	3.3~4.3	3.0~4.2	2.8~4.0	3.3~4.5
AC16、AC20、AC25	3.5~4.5	3.3~4.5	3.0~4.3	3.6~4.8
ATB25	2.7~4.0	—	—	—

注：表 5.5.8-1、5.5.8-2、5.5.8-5 中的强度值是根据强度与加载速度的变化规律计算得到的，行车速度按 80km/h 考虑，换算后其对应的加载速度约为 73MPa/s。

5.5.9 沥青混合料的三维强度模型参数应按本标准 5.1.3 条规定，依据相应的水平确定：

1 水平一，按本规范附录 B，通过直接拉伸试验、单轴压缩试验和间接拉伸试验分别得到强度 S_t 、 S_c 和 S_{it} ，或通过直接拉伸、单轴压缩、围压三轴拉伸试验，分别得到强度 S_t 、 S_c 和 $S_{tri}(\sigma_1, -\sigma_3, -\sigma_3)$ 。

按式 5.5.9-1、5.5.9-2、5.5.9-3 确定路面材料的三维强度模型：

$$\text{拉伸子午线： } \sigma_e^t / S_c = a - b(I_1 / S_c) \quad (5.5.9-1)$$

$$\text{压缩子午线： } \sigma_e^c / S_c = m [a - b(I_1 / S_c)] \quad (5.5.9-2)$$

$$\text{破坏包络线： } \sigma_e(\theta) = \sigma_e^t - (\sigma_e^t - \sigma_e^c) 3\theta / \pi \quad (5.5.9-3)$$

式中符号意义见术语及符号。

根据表 5.5.9，由直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸（或围压三轴拉伸）三组强度试验结果计算其对应的第一应力不变量和有效应力，并分别代入式 5.5.9-1、5.5.9-2、5.5.9-3 求得三维强度模型参数，具体参数计算过程见附录 B。

表 5.5.9 路面材料直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸及围压三轴拉伸强度参数

试验类型	强度 /MPa	第一主应力 σ_1 /MPa	第二主应力 σ_2 /MPa	第三主应力 σ_3 /MPa	第一应力不变量 I_1 /MPa	有效应力 σ_e /MPa	洛德角 $\theta /^\circ$
直接拉伸	S_t	S_t	0	0	S_t	S_t	0
单轴压缩	S_c	0	0	$-S_c$	$-S_c$	S_c	60
间接拉伸	S_{it}	S_{it}	0	$-3S_{it}$	$-2S_{it}$	$\sqrt{13}S_{it}$	46.10
围压三轴拉伸	S_{mi}	σ_1	$-\sigma_3$	$-\sigma_3$	$\sigma_1 - 2\sigma_3$	$\sigma_1 + \sigma_3$	0

2 水平三，参考表 5.5.8-3、5.5.8-4、5.5.8-5 沥青混合料类材料的直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸的强度推荐值，根据附录 B 的计算步骤获取三维强度模型参数 a ， b ， m 。

5.5.10 沥青混合料的疲劳参数应按本标准 5.1.3 条规定，依据相应的水平确定：

1 水平一，根据室内疲劳试验获取模型参数，获取方法同无机结合料稳定类材料，具体见 5.4.7。

2 水平三，参考表 5.5.10 确定疲劳归一化方程参数。

表 5.5.10 沥青混合料的疲劳归一化方程参数

材料	γ
沥青混合料	5.3~6.5

条文说明

疲劳方程考虑了材料的极限强度与加载速度、温度及应力状态的相关性，可通过分别开展单轴压缩、直接拉伸、间接拉伸等试验，得到不同服役条件下的疲劳性能统一表征模型，获取疲劳归一化方程参数。结合料用量高、材料性能好、级配好或压实度大时取高值，反之取低值。

5.5.11 其它规定根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) 实施。

5.6 泊松比

5.6.1 各类材料的抗压泊松比应按表 5.6.1 确定。

表 5.6.1 泊松比取值 (MPa)

材料类型	路基	粒料	无机结合料	密级配沥青混合料	开级配沥青混合料、半开级配沥青混合料
抗压泊松比	0.40	0.35	0.25	0.25	0.40

5.6.2 各类材料的抗拉泊松比应按 $\mu_t = \mu_c E_t / E_c$ 计算确定。

征求意见稿

6 路面结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 路面结构力学指标计算采用双圆垂直均布荷载作用下的双模量非线性弹性半空间层状连续体系理论。

6.1.2 路面结构设计应先初拟结构组合方案，按本标准进行路面结构分析，再结合工程经验和经济分析选定路面结构方案。

6.2 设计指标

6.2.1 路面结构层厚度的确定，应满足沥青混合料层及无机结合料层抗疲劳开裂和沥青混合料层抗车辙变形的要求，路面结构设计应参照表6.2.1作为设计指标。

表 6.2.1 路面设计指标

结构层位	设计指标
沥青混合料面层	沥青混合料层有效应力
	沥青混合料层永久变形量
无机结合料基层	无机结合料稳定层有效应力

条文说明

本标准进行路面结构抗疲劳设计时考虑了实际路面结构所处的三向应力状态，将第四强度理论中的有效应力作为设计指标，并结合材料三维应力状态下的疲劳归一化模型，来评价沥青混合料层和无机结合料稳定层的结构抗疲劳破坏特性。

6.2.2 季节性冻土地区公路，应增加沥青面层低温开裂验算和防冻厚度验算。沥青面层低温开裂指数计算方法应按现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录 B.5 计算，防冻厚度验算应按现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）规范附录 B.6 计算。

6.2.3 路面结构设计时，各设计指标应选用表 6.2.2 规定的层位力学响应；沥青混合料层永久变形量应按图 6.2.1 所示计算点位置，水平位置选取 A、B、C 和 D 四个点位，竖向位置选用沥青混合料层各分层顶面，计算其对应的竖向压应力；沥青混合料层有效应力、无机结合料稳定层有效应力应在其对应的结构层内采用全域搜索法并按三维应力强度比的最大值确定设计点位。

表 6.2.2 各设计指标对应的力学响应

层位	设计指标	力学响应
沥青混合料层	有效应力 σ_{ea}	主应力: σ_1 、 σ_2 、 σ_3
无机结合料稳定层	有效应力 σ_{ec}	主应力: σ_1 、 σ_2 、 σ_3
沥青混合料层	永久变形量 R_a	竖向压应力

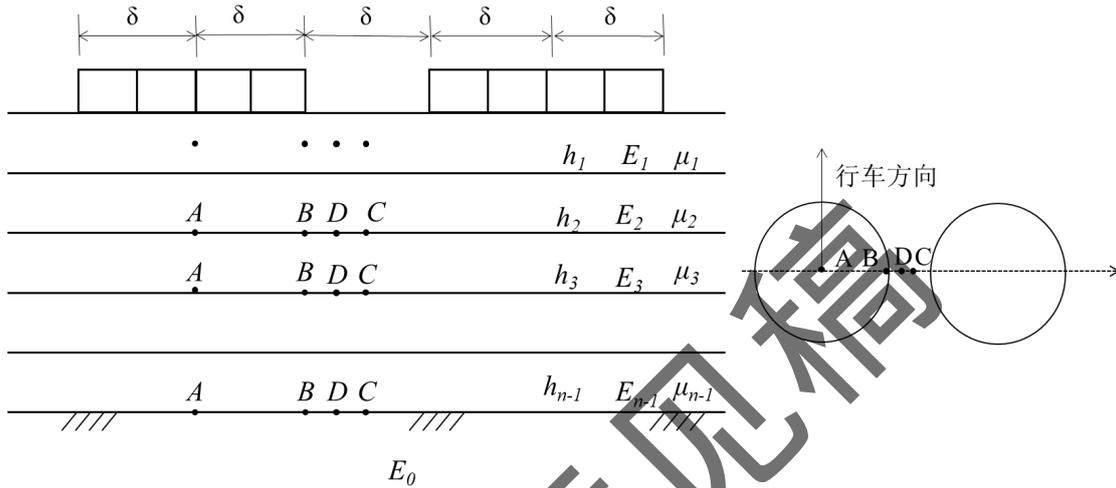


图 6.2.1 力学响应计算点位置图示

条文说明

路面结构进行有效应力分析与验算时，当计算条件或软件功能不能实现沥青层和水稳层的全域搜索时，其有效应力设计点位的确定可参考如下方法：如下图 6.2.2 所示，水平方向选取 A、B、C、D、E、F、G 七个点位，竖直方向以上面层层顶为原点，以 0.5cm 为步长，依次选取相应点位，着重考虑这些点位的主应力。按照本标准三维强度模型对路面结构进行三维应力强度比的校核，即将路面结构内部任意一点的有效应力除以该点对应应力状态下的强度值，即 $\sigma_e / \left[\sigma_e^t - (\sigma_e^t - \sigma_e^c) 3\theta / \pi \right]$ ，其比值越大则越容易发生破坏，由此确定的最大值对应的点位为结构层有效应力验算的设计点位。

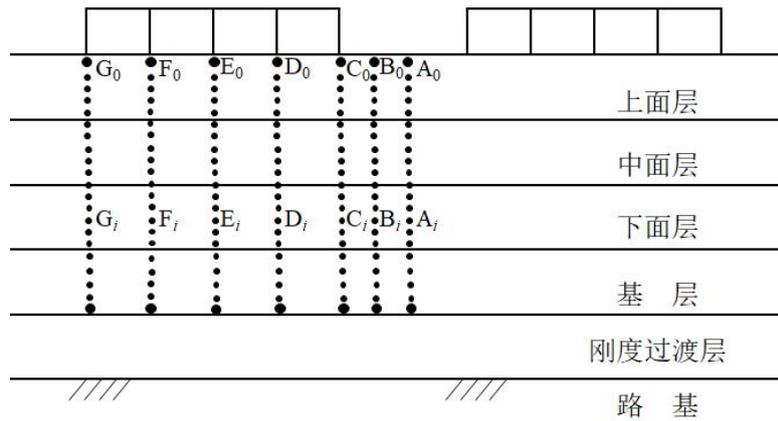


图 6.2.2 面层与基层有效应力设计点位校核分析示意图

6.3 交通、材料和环境参数

6.3.1 各设计指标对应的当量设计轴载累计作用次数，应根据交通参数调查分析结果和本标准第 3 章设计标准规定的设计使用年限，并按现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）规定计算确定。

6.3.2 路面结构验算时结构层模量取值应符合下列规定：

1 沥青混合料面层应采用 15°C 条件下的拉、压回弹模量，并按本标准 5.5 规定的方法确定其取值。

2 无机结合料稳定层应按本标准 5.4 规定的方法确定其拉、压回弹模量。

3 粒料层和路基应分别按本标准 5.2 和 5.3 规定的方法确定其回弹模量。

6.3.3 沥青混合料层和无机结合料层疲劳开裂验算时所需的温度调整系数及沥青混合层永久变形量验算所需的等效温度应根据现行《公路沥青路面设计规范》（JTE D50-2017）实施确定。

6.4 路面结构验算流程

6.4.1 路面结构验算应按图 6.4.1 所示的流程进行，包括下列主要内容：

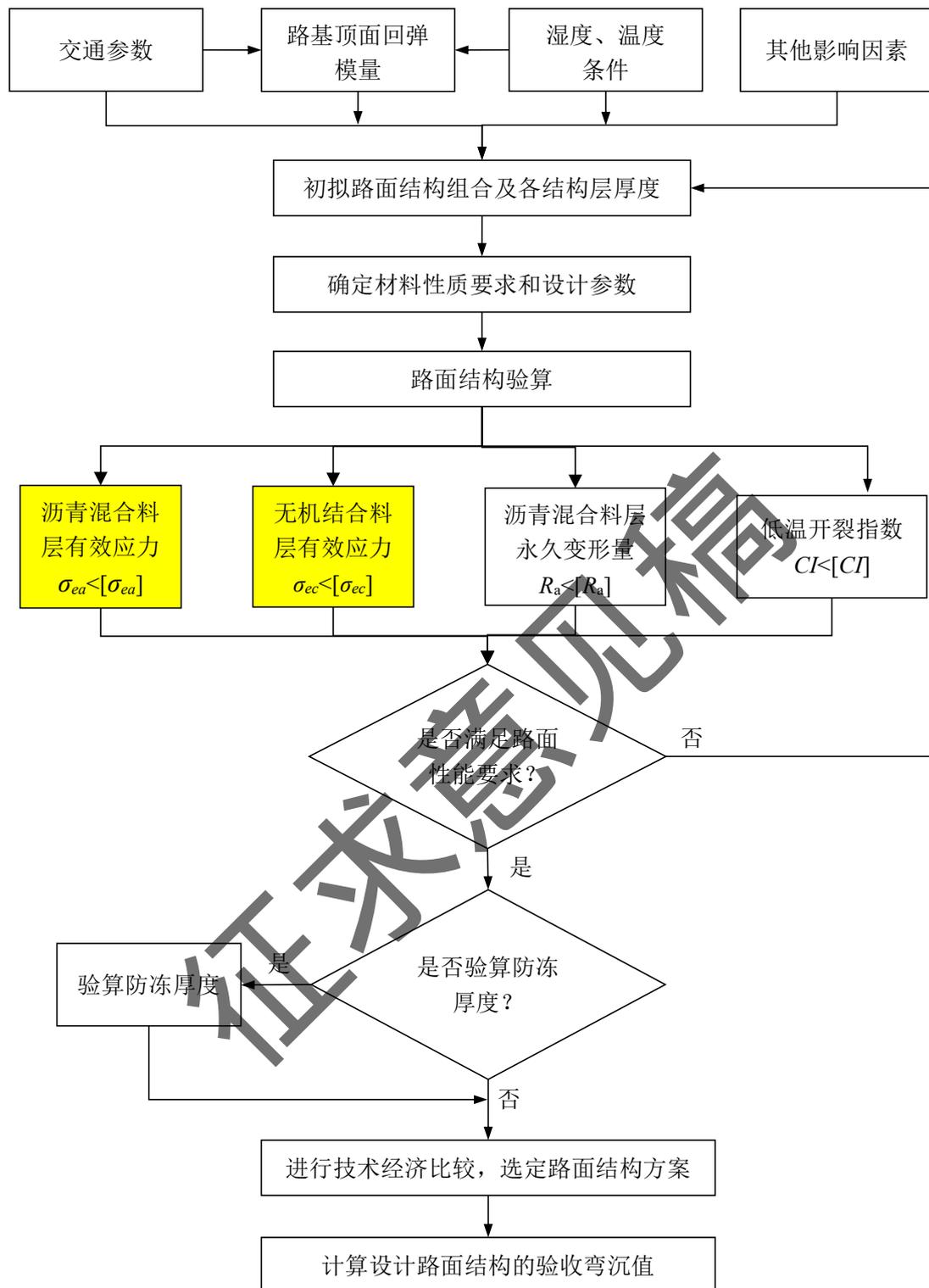


图 6.4.1 公路寿命逐层递增式耐久性沥青路面设计流程

1 按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) 调查分析交通参数, 根据本标准第 3 章设计标准的规定, 确定交通荷载等级。

2 根据路基土类、地下水位高度确定路基干湿类型和湿度状况, 按《公路

沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)及本标准 5.2 的要求,并结合现行《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)的有关规定,确定路基顶面回弹模量及必要的路基改善措施。

3 根据设计要求,收集所在地区的常用路面结构组合和材料性质要求,分析影响路面结构设计的其他因素,按本标准第 4 章结构组合设计相关规定初拟路面结构组合与厚度方案。

4 依据本标准第 5 章的相关要求,确定各结构层拉、压模量等设计参数,并确定各结构层三维应力强度模型参数及疲劳方程参数。

5 按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)的规定,收集工程所在地区气温资料,确定各设计指标对应的温度调整系数或等效温度。

6 采用双模量层状弹性体系理论,计算路面结构各设计指标对应的力学响应量。

7 依据本标准第 3 章的要求和第 6 章的 6.5 及 6.6 节的验算方法,进行路面结构厚度验算。不符合时,调整路面结构方案重新验算,直至符合要求为止。

8 对通过结构验算的路面结构进行技术经济分析,选定路面结构方案。

6.5 疲劳开裂验算

6.5.1 疲劳开裂设计准则

以有效应力作为公路寿命逐层递增式耐久性沥青路面疲劳耐久性设计指标,疲劳强度校核应满足下列要求:

$$\sigma_e \leq [\sigma_e] \quad (6.5.1)$$

式中:

σ_e ——有效应力;

$[\sigma_e]$ ——容许有效应力。

6.5.2 有效应力 σ_e 计算

根据式 6.5.2-1 进行计算:

$$\sigma_e = \sqrt{\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] / 2} \quad (6.5.2-1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——按双圆垂直均布荷载作用下的双模量非线性弹性层

状连续体系理论计算得到的一点的第一、第二、第三主应力，其中，材料双模量本构模型以拉、压回弹模量以及拉、压泊松比为模型参数，其本构关系见式 6.5.2-2:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{cases} = A \begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{cases}, A = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\mu_2/E_2 & -\mu_3/E_3 \\ -\mu_1/E_1 & 1/E_2 & -\mu_3/E_3 \\ -\mu_1/E_1 & -\mu_2/E_2 & 1/E_3 \end{bmatrix} \quad (6.5.2-2)$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力， ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为主应变，参数模量 E 和泊松比 μ 由各自对应相乘的主应力正负性质确定，如 $\sigma_1 > 0$ ，则模量 E_1 和泊松比 μ_1 取拉伸模量 E_t 及拉泊松比 μ_t ，反之取压缩模量 E_c 及压泊松比 μ_c ，参数取值须满足 $R = E_t/\mu_t = E_c/\mu_c$ 的比例关系。路面结构的荷载响应值 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 通过基于迭代思想的数值计算方法获得，推荐采用本标准配套软件麦道(Mroad)进行路面结构计算。

6.5.3 容许有效应力 $[\sigma_e]$ 计算

根据式 6.5.3-1 进行计算：

$$[\sigma_e] = [\sigma_e(\theta)]/K_s \quad (6.5.3-1)$$

式中： $\sigma_e(\theta)$ ——与设计点位三向应力工作条件相对应破坏状态下的三维强度，按下式确定：

$$\sigma_e(\theta) = \sigma_e^t - (\sigma_e^t - \sigma_e^c) 3\theta/\pi \quad (6.5.3-2)$$

σ_e^t ——拉子午线上的极限应力，根据式 6.5.3-3 确定：

$$\sigma_e^t/S_c = a - b(I_1/S_c) \quad (6.5.3-3)$$

σ_e^c ——压子午线上的极限应力，根据式 6.5.3-4 确定：

$$\sigma_e^c/S_c = m[a - b(I_1/S_c)] \quad (6.5.3-4)$$

θ ——罗德角；

$$\cos \theta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (6.5.3-5)$$

I_1 ——第一应力不变量， $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ；

S_c ——单轴压缩强度；

a, b, m ——三维强度模型参数，按本标准附录 B 计算确定；

K_s ——疲劳强度折减系数，依据第 5 章的路面材料三维应力状态下的疲劳归一化模型，按式 6.5.3-6 确定；

$$K_s = (1/\Delta) = (N_f)^{1/\gamma} \quad (6.5.3-6)$$

考虑室内外差异的各种修正后，提出的沥青路面疲劳强度折减系数修正模型为：

$$K_s = k_1 (1/\Delta) = (k_1^\gamma N_f)^{1/\gamma} \quad (6.5.3-7)$$

k_1 ——考虑室内材料与室外足尺路面疲劳破坏过程中荷载间歇时间、裂缝传播速度、交通量折减和横向分布等各种试验条件的差异等因素的修正系数，根据《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97、JTG D50-2006)，沥青混合料层取 0.09，水泥稳定碎石层取 0.35；

Δ ——疲劳应力强度比， $\Delta = \sigma_e / \sigma_{es}$ ， σ_e 为材料疲劳试验初始应力状态对应的有效应力， σ_{es} 为考虑加载速率影响的材料一次性破坏时对应的极限有效应力（强度）；

N_f ——结构层疲劳寿命（轴次）；

γ ——疲劳归一化模型参数，根据本标准第 5 章获取。

6.5.4 沥青混合料层和无机结合料层设计点位的有效应力 σ_e 应不大于各结构层的容许有效应力 $[\sigma_e]$ 。否则，应调整路面结构方案，重新验算，直至满足要求。

6.6 其它指标验算

6.6.1 沥青混合料层永久变形量、沥青面层低温开裂指数、防冻厚度的验算及路面结构验收弯沉值的确定应根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) 实施，其中在各指标的验算或计算过程中需代入的路面结构力学响应值均应按双模量弹性层状体系理论计算得到。

附录 A 路面材料模量参数试验方法

本附录规定路面材料模量参数试验方法，考虑到直接拉伸和无侧限抗压试验、试件内各点的应力状态相同，真实地表征了材料的抗变形特性，推荐这两种试验方法作为沥青类和无机结合料稳定类材料抗拉、抗压模量参数的试验方法。同时，考虑到道路工程界长期以来一直以弯拉和间接拉伸试验方法获取路面材料的模量参数，当不具备直接拉伸试验条件时可选用弯拉和间接拉伸试验代替，或通过弯拉试验和间接拉伸试验一次性获得抗拉模量与抗压模量参数。

A.1 沥青类材料抗压模量的试验方法

1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于测定沥青混合料在线黏弹性范围内的单轴压缩动态模量。在无侧限条件下，按一定的温度和加载频率对试件施加偏移正弦波或半正矢波轴向压应力，量测试件可恢复的轴向应变。本方法适用在 -10°C 、 5°C 、 20°C 、 35°C 及 50°C 条件下采用 0.1Hz 、 0.5Hz 、 1Hz 、 5Hz 、 10Hz 、 25Hz 的加载频率进行测试。

1.2 本方法适用于试验室制备直径为 $100\text{mm}\pm 2\text{mm}$ ，高为 $150\text{mm}\pm 2.5\text{mm}$ 的沥青混合料圆柱体试件。集料的最大公称粒径不得大于 37.5mm 。

1.3 本方法所测得的动态模量可用于评价沥青混合料材料性能，以及作为沥青混合料设计、沥青路面设计和评价分析的参数。

2 仪器与材料技术要求

2.1 材料试验机：能施加偏移正弦波或半正矢波形式荷载的加载设备，施加荷载的频率在 $0.1\sim 25\text{Hz}$ 范围，且施加的最大应力水平应达到 2800kPa 。加载分辨力能达到 5N 。

2.2 环境箱：控温范围 $-10\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，控温准确度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，且具有一定的容量，至少能存放3个试件。

2.3 数据测量及采集系统：采用微机控制，能测量并记录试件在每个加载循环中所承受的轴向荷载和产生的轴向变形。荷载传感器所需最小量程为 $0\sim 25\text{KN}$ ，分辨力不大于 5N ，误差不大于 1% ；位移传感器可采用LVDT或其它合适的设备，具有良好的动态响应特性，其量程应大于 1mm ，分辨率不大于 $0.2\mu\text{m}$ ，误差不大于 $2.5\mu\text{m}$ 。

2.4 加载板：可采用硬质钢板或经处理过的高强度铝板，直径等于或大于试件的直径，分别置于试件的底部和顶部，用来将荷载从试验机传递给试件。

2.5 旋转压实仪：成型直径为 150mm、高度为 170mm 的圆柱体试件。

2.6 钻机：从旋转压实仪成型试件中钻取直径为 100mm 的芯样，要求将钻机及取芯试件固定，钻头与地面垂直。

2.7 切割机：用来将所取芯样切割至动态模量试验试件所需高度，推荐采用双面锯，在能确保芯样两个锯面平行的前提下采用单面锯亦可。

2.8 聚四氟乙烯薄膜，厚度 $0.3\text{mm}\pm 0.05\text{mm}$ 。

2.9 台秤或天平：感量不大 0.1g。

2.10 温度计：分度为 0.5°C 。

2.11 卡尺。

2.12 围压系统：最小分辨率为 0.5kpa，最大误差为 1%。

3 方法与步骤

3.1 试件制备

3.1.1 预备试件制备。该试验用来确定正式试验时试件所需沥青混合料的用量。

(1) 按目标配合比拌制沥青混合料，在规定的拌和温度下拌和均匀后，用旋转压实仪成型 $\phi 150\times 170\text{mm}$ （高）的试件。

(2) 采用钻机从旋转压实仪成型的试件中钻取直径为 100mm~104mm 的芯样。在取芯时应充分固定钻机和取芯试件，钻头与地面垂直，同时保证取芯试件水平放置，调整合适的钻头旋转速度和下降速度，以确保钻取的芯样呈圆柱体，形状规则，周边面光滑且与两个端面垂直。

(3) 采用切割机切除所取芯样两端，保证试件高度为 $150\text{mm}\pm 2.5\text{mm}$ 。将试件固定，保证试件的轴向与锯片垂直，合理调整切割机锯片旋转速度和试件推进速度，以确保试件的两个切割端面平行，且表面平滑无沟纹。对端面平整度要求为沿任何直径方向沟纹高差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内。保证试件的两个端面与试件轴向垂直，当垂直偏差超过 1° 时应舍弃该试件。

(4) 芯样取出后，测量试件的直径。在试件的中部和距上下表面 1/3 试件高度的三个位置测定其直径，每个位置量测 2 次，每测一次后，将试件旋转 90°

再测一次，然后计算 6 个直径测量值的平均值 D 和标准差，如果标准差大于 2.5mm，则舍弃该试件。对于直径符合要求的试件，平均值 D 将作为试件的直径用于后续计算，准确至 0.1mm。

(5) 测量芯样的空隙率，根据芯样空隙率与目标空隙率的偏差来调整并最终确定所需沥青混合料的用量，确保正式试件的空隙率与目标空隙率的偏差能控制在 $\pm 0.5\%$ 范围内。

3.1.2 正式试件制备。根据预备试件制备得到的混合料标准用量按上述步骤制备并量测试件，保证有效试件不少于 4 个。

3.2 试件贮存。试件制备后两天内如不进行试验，需用聚乙烯薄膜将试件包裹好，在温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$ 环境下保存，时间不宜超过两周，存放时试件不可堆叠。

3.3 试验步骤

3.3.1 将位移传感器安置于试件侧面中部，使其与试件端面垂直，沿圆周等间距安放 3 个（即每 2 个相距 120° ）。调节位移传感器，使其测量范围可以测量试件中部的压缩变形。

3.3.2 将试件放置在试验加载架的加载板中心位置，为减少试件表面与上下加载板间的摩阻力，减小端部效应，可在试件与上下加载板间各放一块聚四氟乙烯薄膜，应注意使试件中心与加载架的中心对齐。

注：若进行带围压的试验时，应先将排水管道连接到装载平台上，试件必须通过排水管排出大气压力，还要确保聚四氟乙烯膜上有孔可将空气从膜内排出。将传感器安装在试件的膜外进行测试。

3.3.3 将试件放入规定试验温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的环境箱中，恒温 4~5h 直至试件内部达到试验温度。当试验温度为 5°C 以下时，试件恒温时间应不少于 8h。同时也可以通过在环境箱中放置另一个同类试件，在该试件的中部埋设一个温度传感器，根据传感器测定的试件内部温度判断试件是否达到试验温度。

3.3.4 当试件内外的温度达到测试温度以后，就可以开始进行加载试验。将试件与上加载板轻微接触，调节位移传感器并清零，施加试验荷载，以 5% 的接触荷载对试件进行预压，持续 10s，使试件与上下加载板板接触良好。

3.3.5 对试件施加偏移正弦波或半正矢波轴向压应力试验荷载，在设定温度

下从 25Hz~0.1Hz 由高频至低频按表 A.1 给出的重复加载次数进行试验。在试验之前，先对试件进行加载预处理，预处理的方法是对试件施加偏移正弦波或半正矢波轴向压应力试验荷载，频率为 25Hz，200 个循环。在任意两个试验频率下，推荐试验间隔时间为 2min，间隔时间可适当延长，但不应超过 30min。试验采集最后 5 个波形的荷载及变形曲线，记录并计算试验施加荷载、试件轴向可恢复变形、动态模量及相位角。

表 A.1 各荷载频率下重复加载次数

频率 (HZ)	重复次数 (次)
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

3.3.6 对该试件进行下一个温度试验，温度选择应从-10°C~50°C由低温到高温进行试验。当试件在各设定温度下各频率的试验累计塑性变形超过 1500 微应变，该试件应予以废弃。

4 计算

4.1 量测各试验条件下最后 5 次加载循环中荷载的平均幅值 p_i 和可恢复轴向变形平均幅值 Δ_i ，及同一加载循环下变形峰值与荷载峰值的平均滞后时间 t_i ，然后根据下列各式计算测试沥青混合料的动态模量及相位角：

$$\sigma_0 = \frac{p_i}{A} \quad (\text{A.1})$$

式中： σ_0 ——轴向应力幅值，MPa；

p_i ——最后 5 次加载循环中轴向试验荷载平均幅值，N；

A ——试件径向横截面面积（可取试件上下端面面积均值）， mm^2

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta_i}{l_0} \quad (\text{A.2})$$

式中： ε_0 ——轴向应变幅值，mm/mm；

Δ_i ——最后 5 次加载循环中可恢复轴向变形平均幅值，mm；

l_0 ——试件上位移传感器的量测间距，mm。

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (\text{A.3})$$

式中： $|E^*|$ ——沥青混合料动态模量，MPa；

σ_0 ——轴向应力幅值，MPa；

ε_0 ——轴向应变幅值，mm/mm；

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (\text{A.4})$$

式中： ϕ ——相位角，°；

t_i ——最后 5 次加载循环中变形与荷载峰值的平均滞后时间，s；

t_p ——最后 5 次加载循环的平均加载周期，s。

5 报告

5.1 沥青混合料参数：沥青含量、矿料级配、密度、空隙率及试件尺寸。

5.2 试验参数：各试验温度和试验频率及在此条件下最后 5 次加载循环中应力平均幅值 σ_0 、可恢复轴向应变平均幅值 ε_0 及变形峰值与荷载峰值的平均滞后时间 t_i 。

5.3 当一组试件的测定值中某个测定值与平均值之差大于标准差的 k 倍时，该测定值应予舍弃。有效试件数目为 3、4、5、6 个时，k 值分别为 1.15、1.46、1.67、1.82。

5.4 测试资料整理。根据上述确定的有效测试数据，按 t 分布法计算整理动态模量代表值 $|E^*|$ ：

$$|E^*| = |\bar{E}^*| - t \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.5})$$

式中： $|E^*|$ ——动态模量代表值，MPa；

$|\bar{E}^*|$ ——一组试件实测动态模量平均值，MPa；

S ——一组试件实测值的标准差，MPa；

n ——一组试件的有效试件个数；

t ——随保证率变化的系数。对高速公路及一级公路的保证率为 95%，

其它等级公路的保证率为 90%。 t/\sqrt{n} 值如下表所示。

表 A.2 有效试件数与 t 值的关系

有效试件数 n	临界值 k	t/\sqrt{n}	
		保证率 95%	保证率 90%
3	1.15	1.686	1.089
4	1.46	1.177	0.819
5	1.67	0.954	0.686
6	1.82	0.823	0.603
7	1.94	0.734	0.544
8	2.03	0.670	0.500
9	2.11	0.620	0.466
10	2.18	0.580	0.437

5.5 报告各试验温度和试验频率下沥青混合料动态模量及相位角。

A.2 沥青类材料抗拉模量的试验方法

1 目的与适用范围

本试验方法是通过对沥青混合物试件施加一个单向的轴拉应力，测量其拉伸模量值，该实验方法有助于沥青路面结构分析。

2 仪器与材料技术要求

2.1 拉伸试验机，能施加线性加载；

2.2 测力传感器，满足在 50N-200N 之间测量精度为 5%，在 200N 以上测量精度为 1%。

2.3 拉伸系统，包括三个以 120°布置的应变测量传感器，其测量范围为 45-205mm。测量区域的长度 I_0 应精确到 1mm。50 μ m 的应变应精确到 $\pm 1\mu$ m。在瞬变期之后，测量的应变 I_0z 以 μ m 为单位，应：

当 $Z_j \geq 10^{-4}$ 介于 $(I_0 \cdot a_i \cdot t - (z \cdot 10^3)) - (I_0 \cdot a_i \cdot t + (z \cdot 10^3))$ 之间，

当 $Z_j < 10^{-4}$ 介于 $(I_0 \cdot a_i \cdot t - 0.1) - (I_0 \cdot a_i \cdot t + 0.1)$ 之间。

其中， Z_j 是固定的应变水平

瞬变期是从测试开始到对应于应变达到 15 μ e 所需时间。

2.4 黏接装置，是黏接试样两端的黏接部件，保证其在同一轴线上。

2.5 恒温室，能够在位于测量区域中间水平的单个点处将测试温度保持在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，在室前方距离样品的最大距离为 30mm。对于 0°C 和 15°C 的测试温度，至少在外围 4 个点测量的最大温度范围应小于 0.5°C 。

3 试验准备

3.1 试样的准备，试样应为正交圆柱体（图 A.1），可通过室内旋转压实成型或者现场取芯机取样，试样直径（ ϕ ）为 50~160mm 之间，大于或等于最大公称粒径的 4 倍，测量直径的容许误差应小于 0.5mm，长度（H）为试样直径的 2~3 倍。

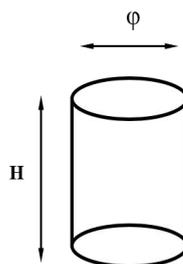


图 A.1 圆柱体试样

3.2 如果从实验室制备的车辙板中取出试样时，圆柱体的轴线应平行于压力装置的运动轴线。

3.3 试样的存放方式应使尺寸保持不变。

3.4 对于同种沥青混合料，应至少进行 4 组对比试验。

4 试验步骤

4.1 试验温度，在进行试验前，应对试样和试验箱进行保温，对于直径 100mm 的试样，应至少保温 4 个小时，保温温度为试验温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，其它情况下，试样至少保温 8 个小时以上。

4.2 将试件按照在试验机上，安装时，施加的荷载不得超过 100kN，试样在开始加载之前，应至少保温 30 分钟，对于低于 -5°C 的测试温度，样品应至少保温 60 分钟。

4.3 进行试验加载，并确定应变 ε_j 的应力 $\sigma(t_j, \theta_j)$ 。

4.4 试样试验后，应通过施加等于或小于 300N 的压缩荷载来消除变形。试样应保持无单轴荷载至少 100s。

4.5 试验原理见图 A.2 所示。

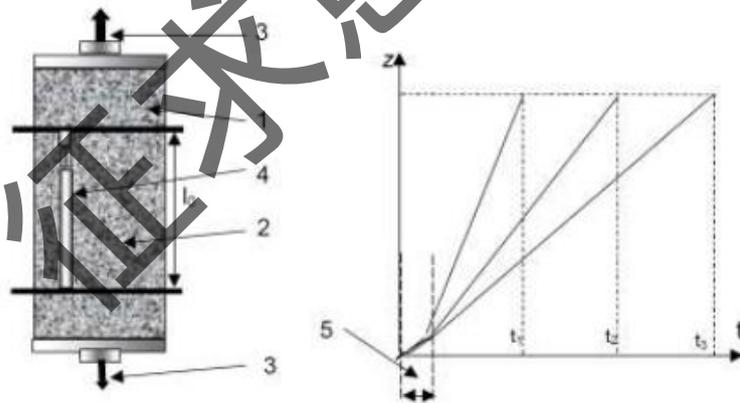


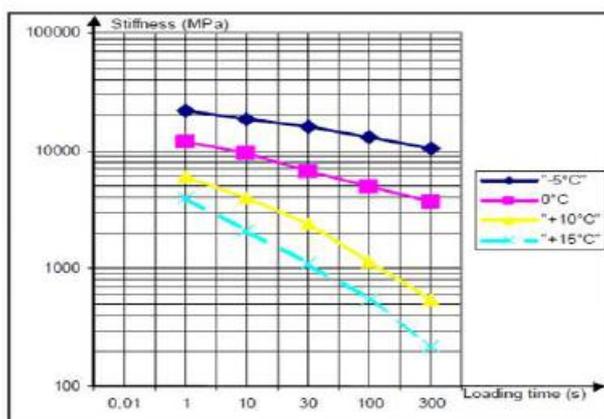
图 A.2 试验原理图

1-试样，2-测量区域，3-力，4-传感器，5-瞬变期

5 计算

5.1 等温线

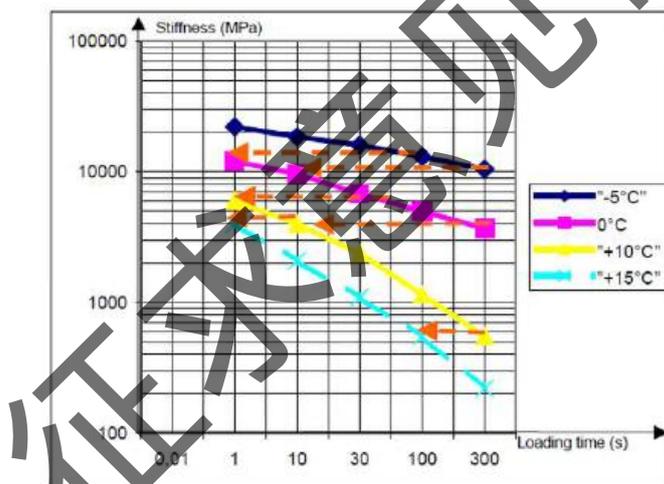
绘制等温曲线，一个测试温度保证需要至少 4 个加载时间，在对数函数下，刚度和加载时间的等温曲线下表示（见图 A.3）



图A.3 等温曲线

5.2 固定温度下的主曲线

固定温度下的主曲线应通过严格按照加载时间标定在其它温度下转换绘制的等温线来建立（图A.4）。换算系数应通过图形或计算方式进行调整，以获得所需温度下的连续曲线（图A.5）。



图A.4 等温线沿加载时间的平移

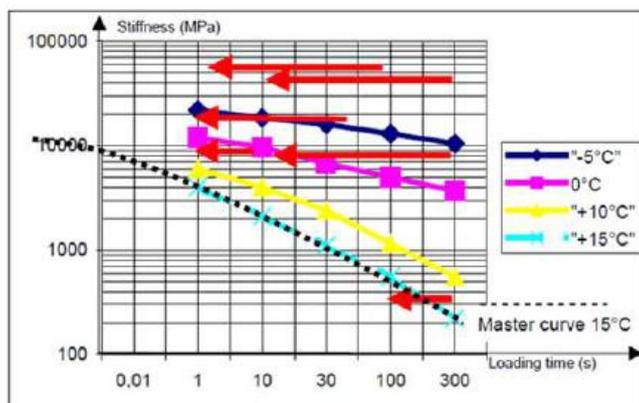


图 A.5 主曲线（15°C）

5.3 确定固定加载时间的拉伸模量，所需加载时间的拉伸模量在主曲线上在

所需温度下确定（图A.6）。

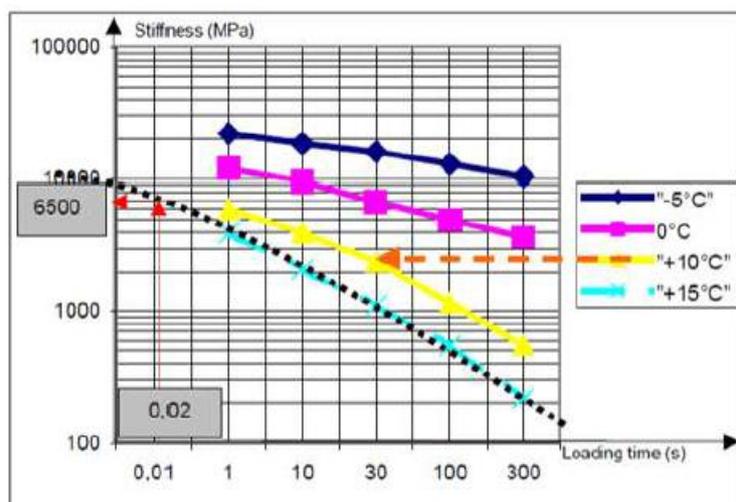


图 A.6 拉伸模量 (0.02S, 15°C)

征求意见稿

A.4 无机结合料稳定类材料抗拉模量的试验方法

1 目的与适用范围

本试验方法是通过对水泥稳定碎石试件施加一个单向的轴拉应力，测量其拉伸模量值，该实验方法有助于水泥稳定碎石路面结构分析。

2 仪器与材料技术要求

2.1 拉伸试验机，能施加线性加载。

2.2 测力传感器，满足在 50N-200N 之间测量精度为 5%，在 200N 以上测量精度为 1%。

2.3 配备伺服液压或气压材料试验系统地试验机，测量精度不应低于±1%，加载速度应由电脑控制，应能实现均匀连续地加载卸载，并应能保持固定荷载，最大量程不应小于 300kN。

2.4 加载板可采用硬质钢板或高强度铝板，应分别置于试件的底部和顶部。

2.5 轴向变形 l 应采用位移传感器从试件侧面量取，位移传感器的量程不应小于 5mm，分辨率应能达到 1 μ m。

2.6 应采用电脑控制数据采集系统，应记录每隔 0.01s 的荷载和试件轴向变形。

2.7 振动搅拌机，采用振动拌和方式对混合料进行拌和，保证材料分布的均匀性。

3 试验准备

3.1 成型 100mm×100mm×400mm 的中梁试件，试件与拉头之间通过环氧树脂粘钢胶粘结，粘钢胶粘结强度远大于水泥稳定碎石抗拉强度且变形小，能保证直接拉伸强度试验的顺利进行。

3.2 对无机结合料稳定土和无机结合料稳定公称最大粒径不大于 26.5mm 的粒料，试件不应少于 9 个；对无机结合料稳定公称最大粒径大于 26.5mm 的粒料，试件不应少于 15 个。

3.3 脱模后将符合要求的试件小心移至养生室，并根据现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009) T 0845 规定对试件进行标准养生或快速养生。

3.4 试件应浸水 24h，取出后擦干表面水称量，试件养生后与成型时的质量

相差不应大于 2%，否则试件失效。试件从搬出养生室到试验完成的时间间隔应尽量短。

3.5 压力机应以 1mm/min 的加载速度连续均匀施加荷载，直至试件破坏。



图 A.9 直接拉伸试验示意图

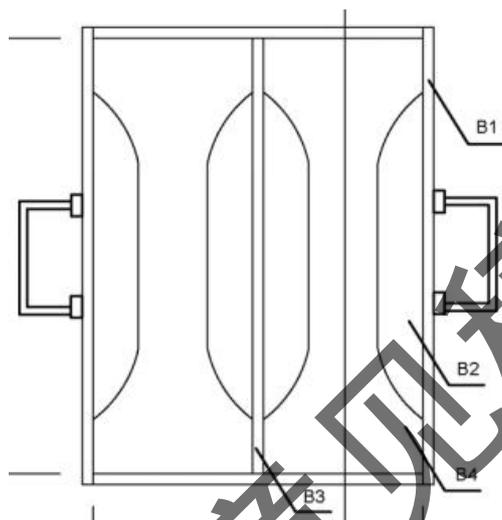


图 A.10 路面材料直接拉伸试验试件成型模具的装配图

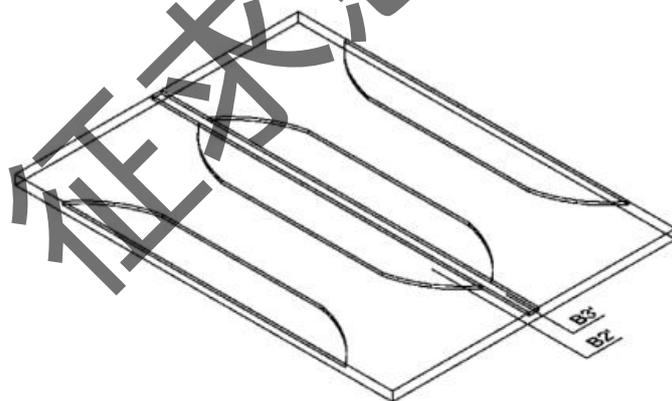


图 A.11 路面材料直接拉伸试验试件成型模具底板上限位槽示意图

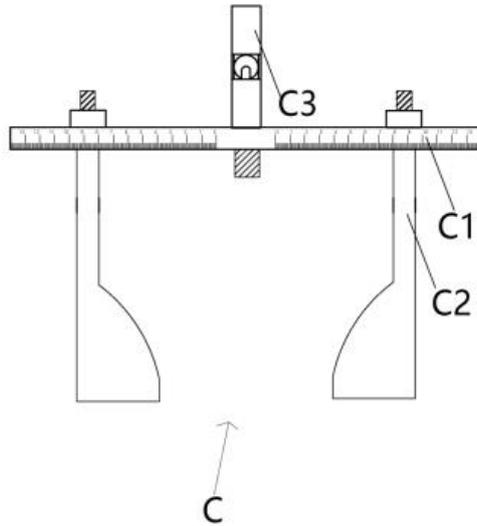


图 A.12 路面材料直接拉伸试验上部夹具结构示意图

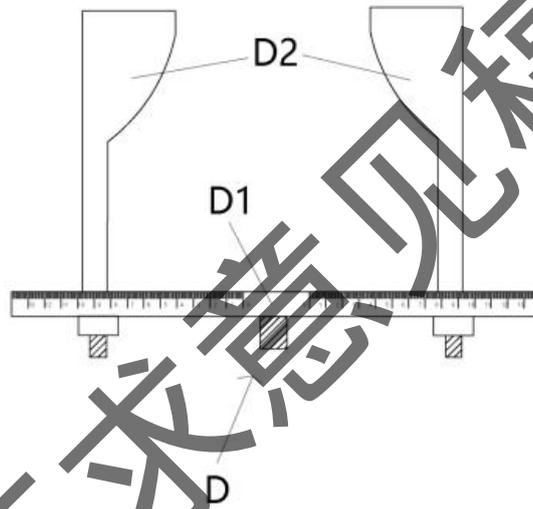


图 A.13 路面材料直接拉伸试验下部夹具结构示意图

4 试验步骤

4.1 试验前将所述下部夹具的下标尺梁通过螺丝与试验机连接，然后装上一对下夹持板，通过螺帽将下夹持板固定于下标尺梁上的某一位置上。

4.2 将上部夹具的球铰连接杆连接到试验机上，通过螺丝将上标尺梁与球铰连接杆连接，再装上一对上夹持板，通过螺帽将上夹持板固定于上标尺梁上的某一位置。

4.3 根据振动击实试验确定的含水率与密实度进行配制混合料，试验前先进行冷却防止加入的水蒸发，先开启搅拌样机调至常规搅拌状态，依次将矿料、水泥、水加入后，开启振动模式搅拌 40s 后装入试模进行振动成型。

4.4 将制备好的所述路面材料直接拉伸试件装于上部夹具和下部夹具之间，

并通过微调试验机，使得上述试件与上部夹具、下部夹具位置对应；若返现上述试件的位置并不居中，可调节上夹持板或下夹持板的位置，使上述试件处于拉伸的正中位置。

4.5 启动试验机，开始试验，直至上述试件被拉断，然后分别松开上夹持板、下夹持板，取出拉断试件，保存数据。

4.6 试件应变 ε 应取3个位移传感器测得的试件变形量平均值计算。试验过程中应记录荷载—应变曲线。

5.计算

$$S_t = \frac{P}{a \times b} \quad (\text{A.6})$$

$$\varepsilon = \frac{l}{L} \quad (\text{A.7})$$

$$S_D = \frac{S_t}{\varepsilon} \quad (\text{A.8})$$

式中： S_t ——试件的直接拉伸强度（MPa）；

P ——试件破坏时的最大荷载（N）；

a 、 b ——试件截面的长和宽（mm）；

L ——试件的长度（mm）；

l ——试件破坏时的变形（mm）；

ε ——试件破坏时的应变；

S_D ——直接拉伸劲度模量（MPa）。

6.试验报告

6.1 同一组试件试验中，应采用3倍均方差法剔除异常值。

6.2 对无机结合料稳定土和无机结合料稳定最大粒径不大于26.5mm的粒料，试验结果变异系数不应超过10%；对无机结合料稳定最大粒径大于26.5mm的粒料，试验结果变异系数不应超过15%。不满足时，应增加试验数量，将新增试验结果与原试验结果合并重新统计变异系数，直至变异系数满足上述规定。

6.3 试验报告应包括试件成型方式、试件尺寸、试件成型时和试验时的质量、试件养生或存放条件、试件龄期、试验日期、试验结果的最小值和最大值、平均值、标准差和变异系数。

A.5 无机结合料稳定类材料抗压模量试验方法参照规范《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2017)附录E执行。

征求意见稿

A.6 无机结合料稳定类材料间接拉伸模量的试验方法

1. 适用范围

本方法适用于无机结合料稳定类材料试件间接拉伸模量试验。

2. 试验目的

路面结构中水泥稳定碎石基层在交通荷载作用下承受拉应力和应变，因此，拉伸强度也被作为表征水泥稳定材料性能的重要参数。

3. 试验方法与步骤

3.1 试件高度为 150mm、直径为 150mm 的圆柱体试件，脱模后将符合要求的试件小心移至养生室，在标准条件下 [温度 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ ，湿度不小于 95%] 养生至所需龄期后进行试验。

3.2 按照间接拉伸疲劳试验方法 (JTG E51-2009)，将圆柱形试件安置试验夹具的夹条上，上下对中，以防荷载加载沿两边时发生偏移，在间接拉伸试件前、后面圆心位置处分别确定水平径向和竖直径向位置，并在该两处分别固定好 LVDT 位移传感器，保证传感器所辖长度中点要与前后面的圆心重合，以记录竖直径向的压变形和水平径向的拉变形，用于间接拉伸拉压双模量的计算。试验加载示意图如图 A.14 所示。

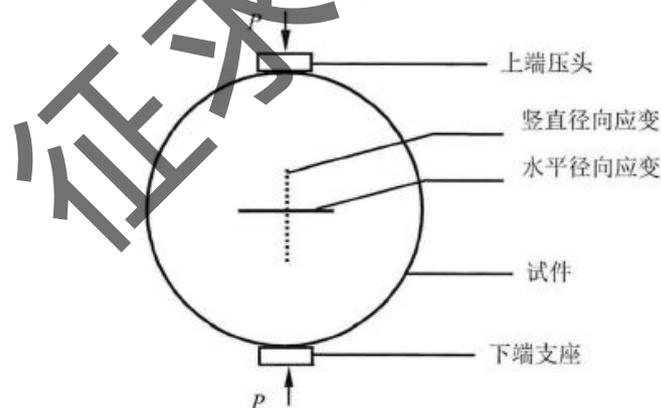


图 A.14 间接拉伸试验加载示意图

3.3 在试件两端粘贴位移传感器，一端测试水平位移，一端测试竖向位移。与单轴压缩疲劳试验同理，调整好试验参数，并以 0.2 强度比应力水平预压 2min，根据强度试验结果，设置不同应力水平的强度参数进行疲劳试验，试验原理如图 A.15 所示。

3.4 间接拉伸需要采集的疲劳寿命由 MTS 电脑控制系统直接采集，材料变形则由固定在试件两侧的位移传感器测定，连接好 MTS 系统后试件需放在恒温箱 15°C 的条件下保温 4-5 个小时，且试验过程均在恒温箱中进行。

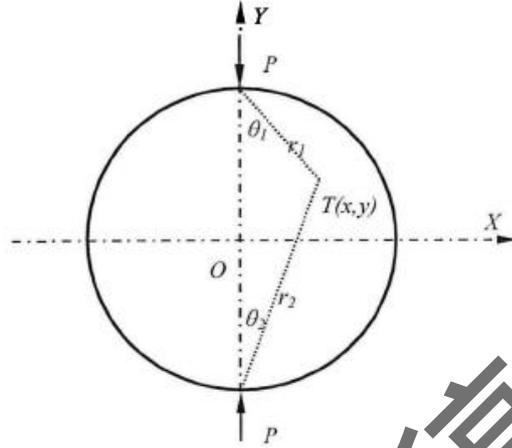


图 A.15 间接拉伸疲劳试验测试原理

4. 间接拉伸模量公式

目前，对间接拉伸试验普遍采用的巴西圆盘的计算公式进行求解，由图 A.15 可知，试件处于对心受压状态，根据平面问题的弹性力学解析解和 OX 轴、OY 轴的几何特征，结合艾里应力函数和线性弹性叠加原理，得到了直角坐标下巴西圆盘任意点 T (x, y) 的应力解析方程如下所示。

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi L} \left(\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi DL} \quad (\text{A.9})$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi L} = \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2P}{\pi DL} \quad (\text{A.10})$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi L} \left(\frac{\sin \theta_1 \cos^2 \theta_1}{r_1} + \frac{\sin \theta_2 \cos^2 \theta_2}{r_2} \right) \quad (\text{A.11})$$

D、L 分别为拟定圆柱间接拉伸的直径、高，P 为试件破坏所承受最大荷载，r₁、r₂ 分别为任意点 T (x, y) 到圆盘上下顶点的距离。

将材料看作各向同性线弹性体，在结合广义胡克定律推算得到间接拉伸模量：

$$E = \frac{s_x - m s_y}{e_x} \quad (\text{A.12})$$

附录 B 路面材料强度参数试验方法

本附录规定路面材料强度参数的试验方法，宜通过直接拉伸试验、间接拉伸试验和单轴压缩试验，建立由线性化的拉、压子午线和强度包络线表征的、以有效应力为指标的沥青路面材料三维强度模型。

B.1 沥青混合料单轴抗拉强度试验

1 目的与适用范围

本试验方法适用于测定热拌沥青混合料的抗拉强度。适用于最大公称粒径不超过 37.5mm 的沥青混合料。

2 仪器与材料技术要求

2.1 直接拉伸试验系统：包括试验仪器、温控箱和测量系统。

2.2 外部调节室：温度调节室应能在 5°C~25°C 的温度范围内控制温度，精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。该温控室至少能容纳一个待测的沥青混合料试件，以及一个在试件内部和表面安装热电偶的监测试件，可做参考温度。

2.3 轴向变形测量系统：使用安装于黏贴在试件标记点之间的传感器测量轴向变形，见图 B.1。变形测量方式包括以下模式：间隔 180 度的 2 个标记点，或间隔 120 度的 3 个标记点，或间隔 90 度的 4 个标记点。

注 1：推荐使用 LVDT 传感器（线性可变差动传感器）。若选择测头型传感器（弹簧式 LVDT），应确保弹簧弹力适中，避免将测量点分，此时可用试验温度下黏附在试件上的弹簧式 LVDT 监测试件的变形情况。

注 2：使用相隔 90 度设置的四个传感器时，比其它的传感器布置方式具有优势。因为一旦某个传感器无法正常工作，可放弃相对该传感器 180 度的另一个传感器，转而使用剩余的 2 个传感器来测量试件的平均变形。

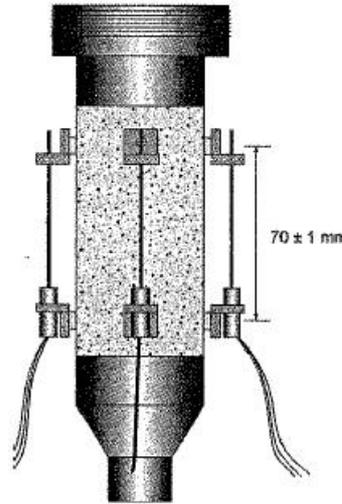


图 B.1 标记点常规布置方式示意图

2.4 加载板：需将机器荷载从试件上下两个方向移到试件上。目标试件的直径为 100 mm，加载板的直径应保持在于目标试件直径 $\pm 0.05\text{mm}$ 的范围内。应采用硬化电镀钢或阳极氧化高强度铝制作加载板，若加载板质地较软，则应频繁更换。不得使用线弹性模量和硬度低于 6061-T6 的铝材。应在每个加载板表面设置一些凹槽，以便胶水可以更好的附着在加载板上。在试验仪器正常使用时，上部装载板应不产生偏心荷载。

注 3：端板上的凹槽能提升胶和加载板间的附着力。凹槽建议深度为 0.6 mm，横向间隔约为 1.9mm。开槽方式为同心圆弧或螺旋形图案。建议使用 V 形槽或网纹槽。

2.5 端板胶结装置：应能将端板与沥青混合料试件黏结在一起。试件应能在装置内与端板自动对中，并确保试件和端板两者之间不存在偏心。可以通过夹紧或其他方式，将胶结设备固定在指定高度下至少 4 小时。若没有夹具，可将试件直接黏结在试验机器上。应在机器的负载模式下完成胶结工作，机器施加的压应力不得超过 0.045kN。

3 试验准备

3.1 直接拉伸试验所用试件应从较大的 Superpave 旋转压实试件上，通过钻芯取样和切割的方式获得，试件直径为 150 mm，最小高度为 180 mm。试验所用试件的平均直径应介于 100 mm -104 mm，标准偏差小于 0.5 mm。试件的平均高度应介于 127.5 mm-132.5 mm 之间。

注 4：使用的试件高度和切割方式，取决于给定压实机器的孔隙率梯度和

切割设备的能力。对于压实到 180mm 高度的试件，应首先切下底部 25mm 高度的材料，因为试件底部是旋转压实机器的模具部分。

3.2 试验室制备的沥青混合料应在烘箱内进行 4 小时的短期老化。现场沥青混合料不需要在试验前老化。

3.3 沥青混合料试件孔隙率范围不得超过规定的 $\pm 0.5\%$ 。

3.4 每种试验条件下，测试一个重复样品。

注 5：若 2 天内不对试件进行测试，建议用聚乙烯包裹每个试件，或将其密封在聚乙烯袋中，存放在温度为 5°C~25°C 的无照明区域。试件不得堆放存储，为了防止老化对试验结果的影响，建议在试验前，试件的存放时间不超过 2 周。

3.5 设置试验设备

3.5.1 使用手动钢丝刷或电动钢丝刷，彻底刷洗每个加载板表面，并清洁所有端板。用钢丝刷清洁加载板后，用在丙酮或类似溶剂中浸泡过的毛巾擦拭机器表面的灰尘。

3.5.2 使用含少量丙酮溶剂的毛巾，擦拭试件末端，清除残留灰尘。

3.5.3 取适量胶水将端板和试件黏在一起。整个黏结过程约 10-20 min，可按照此黏结时间准备胶水。

3.5.4 将胶水填满试件顶部和底部表面的所有缝隙。

3.5.5 将剩余胶水分成四份均匀地涂抹在端板和试件上下两面之间（即端板顶面 1/4，端板底面 1/4；试件顶面 1/4，试件底面 1/4），将端板插入黏结夹具中，并将试件小心地插入端板的上下两端，尽量让试件靠近端板中心。然后拧紧夹具，将端板和试件调整到正中心，轻轻将顶板降低到指定位置。注意不要让顶板与试件完全贴合，为保证胶水有足够的黏结力，至少应给胶水预留 1mm 的厚度。在胶水硬化前擦拭或刮去多余部分，等待胶水黏结力达到其设计值后，再通过夹具移动试件。

3.5.6 从胶黏夹具上手托起底部后取下试件，避免直接从上部提拉试件，以免破坏胶水的胶结。

3.5.7 使用环氧树脂黏合剂将轴向传感器的安装螺栓连接到试件侧面。夹具应满足下表的规定值。

表 B.1 试件变形测量系统的最低要求

性能	值
标记点接触区域	80 mm ² ± 10 mm ²
沿标记长方向的标记点大小	10 mm ± 2 mm
安装系统和传感器的质量	最多 80g

3.5.8 用于测量 100mm 直径试件的轴向变形的标记长度应为 70mm±1mm，两个标记点的间距定义为两个中心点的直线距离。可使用合适的对准和间隔夹具来帮助安装轴向变形测量设备。标记长度的测量应为不同标记点中心的距离，所有传感器的安装标记长度应相同。试验开始前，应让胶水完全固化。

4 直接拉伸强度计算公式为：

$$S_t = \frac{P}{a \times b} \quad (B.1)$$

式中： S_t ——试件的拉伸强度 (MPa)；

P ——试件破坏时的最大荷载 (N)；

a 、 b ——试件截面的长和宽 (mm)。

条文说明

本方法主要参考AASHTO TP107编写。试验可采用AMPT进行。

B.2 沥青混合料单轴压缩强度试验

1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于测定热拌沥青混合料的抗压强度。按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017) 确定沥青混合料结构层的设计参数时应按本方法执行。如无特殊规定, 用于计算弯沉的抗压回弹模量的标准试验温度为 20°C, 用于验算弯拉应力的抗压回弹模量的标准试验温度为 15°C。加载速率为 2mm/min。

1.2 本方法适用于直径 100mm±2.0mm, 高 100mm±2.0mm 的沥青混合料圆柱体试件。亦可采用由轮碾成型后切制的长 40mm±1.0mm、宽 40mm±1.0mm、高 80mm±2.0mm 的棱柱体试件, 用棱柱体法测定单轴压缩强度。

2 器具与材料技术要求

2.1 万能材料试验机, 其它可施加荷载并测试变形的路面材料试验设备也可使用, 但均必须满足下列条件:

2.1.1 最大荷载应满足不超过其量程的 80%, 且不小于量程的 20% 的要求, 宜采用 100kN, 分度值 100N。具有球形支座, 压头可以活动与试件紧密接触。

2.1.2 具有环境保温箱, 控温准确至 0.5°C。当缺乏环境保温箱时, 试验室应设置空调, 控温准确至 1.0°C。

2.1.3 能符合加载速率保持 2mm/min 的要求。试验机宜有伺服系统, 在加载过程中速度基本不变。

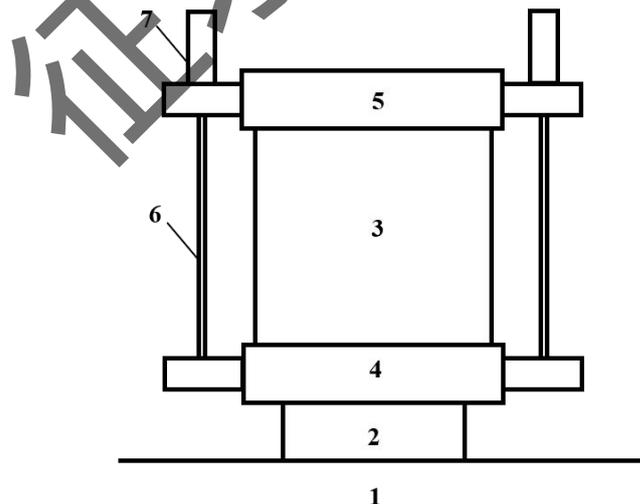


图 B.2 变形量测装置

1-试验机台; 2-球座; 3-试件; 4-下压板; 5-上压板; 6-顶杆; 7-千分表或其它变形量测装置

2.2 变形量测装置

抗压试验加载用上下压板，下压板下有带球面的底座。压板直径为 120mm，在直径 102mm 处有一浅的放置试件的圆周刻印。下压板直径线两侧有立柱顶杆，上压板直径线两侧装有千分表架，表架中心与顶杆中心位置一致。当试验机具有自动测定试件垂直变形或自动测记试件的压力与变形曲线功能时，可以直接使用，不必另外配备变形量测装置。

2.3 千分表（1/1000mm），2 只。

2.4 恒温水槽：用于试件保温，温度能满足试验温度要求，控温精密度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。恒温水槽的液体应能不断循环回流。深度应大于试件高度 50mm。

2.5 台秤或天平：感量不大于 0.5g。

2.6 温度计：分度为 0.5°C 。

2.7 秒表、卡尺。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

3.1.1 按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20-2011）静压法成型沥青混合料试件，也可从轮碾机成型的板块试件上用钻芯机钻取试件。试件尺寸应符合直径 $100\text{mm}\pm 2.0\text{mm}$ 、高 $100\text{mm}\pm 2.0\text{mm}$ 的要求。如有条件，可采用振动压实或搓揉法成型试件（试件尺寸及成型方法应在报告中注明）。试件的密度应符合马歇尔标准击实密度 $100\%\pm 1.0\%$ 的要求。

3.1.2 试件成型后不等完全冷却即可脱模，用卡尺量取试件高度，最高部位与最低部位的高度差超过 2mm 时试件应作废。用于抗压强度试验的试件数不得少于 3 个，用于抗压回弹模量的一组试件数宜为 3~6 个。

3.1.3 将试件放置在室温条件下 24h，用卡尺在各个试件上下两个断面的垂直方向上正确量取试件直径，取 4 个数的平均值作为试件的计算直径（d），准确至 0.1mm。

3.1.4 用卡尺在各个试件的 4 个对称位置上正确量取试件高度，取 4 个数的平均值作为试件的计算高度（h），准确至 0.1mm。

3.1.5 按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20-2011）的方法测定试件的密度、空隙率等各项物理指标。

3.1.6 将试件置于规定的试验温度（15°C或20°C）的恒温水槽中保温2.5h以上，保温时试件之间的距离应不小于10mm。此时压板、底座也应同时保温。在有空调的试验室内测试时，将室温调至要求的温度，试件放置12h以上。

3.1.7 使试验机环境保温箱或空调试验室达到要求的试验温度。

3.2 抗压强度试验步骤

3.2.1 将下压板、底座置于试验机升降台座上对中，迅速取出试件放在下压板中央刻线位置，加上上压板。

3.2.2 将试件从恒温水槽中取出，立即置于压力机台座上，以2mm/min的加载速率均匀加载直至破坏，读取荷载峰值（P），准确至100N。

4 计算

沥青混凝土试件的单轴抗压强度按式（B.2）计算。

$$S_c = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (\text{B.2})$$

式中： S_c ——试件的抗压强度（MPa）；

P ——试件破坏时的最大荷载（N）；

d ——试件的直径（mm）。

条文说明

沥青混合料的单轴压缩试验采用对沥青混合料试件按规定方法逐级加载卸载，测定试件的抗压回弹模量，以及一次性加载至破坏时的最大应力即抗压强度，均以MPa计。1983年试验规程沥203—83关于沥青混合料抗压强度试验，规定的试验条件是参照前苏联的方法及我国的工程实践制定的。多年来，实际进行的并不多，主要是试验目的不明确，试验条件与美国等国家标准也有较多差别，修订时主要考虑《公路沥青路面设计规范》对材料设计参数的要求，增补了材料回弹模量的测定方法。

沥青混合料单轴压缩试验所用的试件在国外有不同的规定，ASTM D 1074及AASHTO T 167规定压实后圆柱形试件的直径与高度比为1:1，并规定试件的高度与直径之差不超过±2.5%，直径不小于集料最大粒径的4倍，亦不小于2in。通常采用直径101.6mm，高度101.6mm±2.5mm的圆柱体。我国原试验规程沥203—83中也规定为1:1试件，试件尺寸有φ50mm×50mm、φ70mm×70mm、

$\phi 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 三种,均采用静压法成型。现仅保留 $\phi 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 圆柱体。故本方法规定圆柱体试件仍用静压法成型,也可用搓揉法或振动成型法制作。

试件加载速度ASTM D 1074规定高度应变速率控制为 $0.05\text{mm}/(\text{min}\cdot\text{mm})$,对 $\phi 101.6\text{mm}$ 的试件用 $5.08\text{mm}/\text{min}$ 速度加载。AASHTO T 167规定高度方向应变速率控制为 $1.3\text{mm}/(\text{min}\cdot 25\text{mm})$,即对 $\phi 50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 试件为 $2.5\text{mm}/\text{min}$,对 $\phi 200\text{mm}\times 200\text{mm}$ 试件为 $10\text{mm}/\text{min}$,对 $\phi 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 试件为 $5\text{mm}/\text{min}$ (与ASTM相同)。

关于加载速率,无特殊规定时,采用 $2\text{mm}/\text{min}$,根据需要也可采用其他速率。试验温度,按《公路沥青路面设计规范》的规定采用 20°C 或 15°C 。

沥青混合料是黏弹性材料,不同的温度和加载速率对混合料的变形性能影响很大,因此试验过程中,必须高度重视这一点。如果试验机缺乏环境保护箱,可以考虑在安装有空调的房间内进行,对 20°C 和 15°C 试验温度来说,空调保温应该没有太大困难。

关于试验数据的整理方法,目前还有一些不同意见,主要是数据本身一般并不成线性关系,而且,随荷载的加大,变形越来越小,故模量反而越来越大。究竟如何整理为好,今后当应继续研究。本规程既然规定了修正原点的方法,就应统一采用此法,否则结果会有较大差异。

精密度在原试验规程中规定试件平行试验的容许误差为 10% ,而ASTM及AASHTO中规定重复性精密度为,两组试件(每组3个)平均值误差不得大于 407kPa ,试验结果中最大值与最小值之差不得大于 841kPa ,再现性精密度分别为 372kPa 及 1055kPa 。本试验方法考虑到在不同温度下的抗压强度相差很大,统一规定此数值不适宜,并作了新的规定。

B.3 沥青混合料间接拉伸试验

1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于测定沥青混合料在规定温度和加载速率时间间接拉伸破坏或处于弹性阶段时的力学性质，亦可供沥青路面结构设计选择沥青混合料力学设计参数及评价沥青混合料低温抗裂性能时使用。试验温度与加载速率可由当地气候条件根据试验目的或有关规定选用，但试验温度不得高于 30℃，如无特殊规定，宜采用试验温度 15℃±0.5℃，加载速率为 50mm/min。当用于评价沥青混合料低温抗裂性能时，宜采用试验温度-10℃±0.5℃及加载速率 1mm/min。

1.2 本方法测定时采用的沥青混合料泊松比 μ 值见表 B.2，其他试验温度的 μ 值由内插法确定。本方法也可由试验实测的垂直变形及水平变形计算实际的 μ 值，但计算值必须在 0.2-0.5 范围内。

表 B.2 间接拉伸试验使用的泊松比 μ

试验温度 (°C)	≤10	15	20	25	30
泊松比 μ 值	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45

1.3 本方法采用的圆柱体试件应符合下列要求：

1.3.1 当集料公称最大粒径小于或等于 26.5mm 时，用马歇尔标准击实法成型的直径为 $\phi 101.6\text{mm} \pm 0.25\text{mm}$ 、高为 $63.5\text{mm} \pm 1.3\text{mm}$ 的试件。

1.3.2 从轮碾机成型的板块试件或从道路现场钻取直径为 $\phi 100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 或 $\phi 150\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 、高为 $40\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 的圆柱体试件。

2 仪器与材料技术要求

2.1 试验机：能保持规定的加载速率及试验温度的材料试验机，当采用 50mm/min 的加载速率时，也可采用具有相当传感器的自动马歇尔试验仪代替，但均必须配置有荷载及试件变形的测定记录装置。荷载由传感器测定，应满足最大测定荷载不超过其量程的 80%且不小于其量程的 20%的要求，宜采用 40kN 或 60kN 传感器，分辨率为 10N。

2.2 位移传感器：可采用 LVDT 或电测百分表。水平变形宜用非接触式位移传感器测定，其量程应大于预计最大变形的 1.2 倍，通常不小于 5mm。测定垂直变形精密度不低于 0.01mm，测定水平变形的精密度不低于 0.005mm。

2.3 数据采集系统或 X-Y 记录仪：能自动采集传感器及位移计的电测信号，

在数据采集系统中储存或在 X-Y 记录仪上绘制荷载与跨中挠度曲线。

2.4 恒温水槽：用于试件保温，温度范围能满足试验要求，控温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。当试验温度低于 0°C 时，恒温水槽可采用 1: 1 的甲醇水溶液或防冻液作冷媒介质。恒温水槽中的液体应能循环回流。

2.5 压条：如图 B.3 所示，上下各 1 根。试件直径为 $100\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 或 $101.6\text{mm}\pm 0.25\text{mm}$ 时，压条宽度为 12.7mm ，内侧曲率半径 50.8mm ；试件直径为 $150\text{mm}\pm 2.5\text{mm}$ 时，压条宽度为 19mm ，内侧曲率半径 75mm 。压条两端均应磨圆。

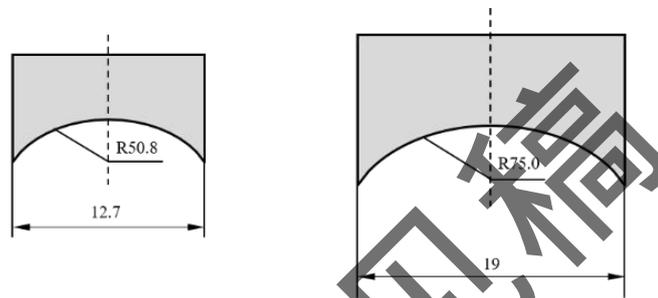


图 B.3 压条形状

2.6 间接拉伸试验夹具：下压条固定在夹具上，上压条可上下自由活动。

2.7 其他：卡尺、天平、记录纸、胶皮手套等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

3.1.1 根据 1.3 的规定，按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20-2011）方法制作圆柱体试件。

3.1.2 按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20-2011）的规定测定试件的直径及高度准确至 0.1mm 。在试件两侧通过圆心画上对称的十字标记。

3.1.3 按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20-2011）方法测定试件的密度、空隙率等各项物理指标。

3.1.4 使恒温水槽达到要求的试验温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。将试件浸入恒温水槽保温不少于 1.5h 。当为恒温空气箱时保温不少于 6h ，直至试件内部温度达到试验温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 为止。保温时试件之间的距离不少于 10mm 。

3.1.5 使试验机环境保温箱达到要求的试验温度，当加载速率大于或等于 $50\text{mm}/\text{min}$ 时，也可不用环境保温箱。

3.2 试验步骤

3.2.1 从恒温水槽中取出试件，迅速置于试验台的夹具中安放稳定，其上下均安放有圆弧形压条，与侧面的十字画线对准，上下压条应居中、平行。

3.2.2 迅速安装试件变形测定装置。水平变形测定装置应对准水平轴线并位于中央位置；垂直变形的支座与下支座固定，上端支于上支座上。

3.2.3 将记录仪与荷载及位移传感器连接，选择好适宜的量程开关及记录速度。当以压力机压头的位移作为垂直变形时，宜采用 50mm/min 速率加载。记录仪走纸速度根据试验温度确定。

3.2.4 开动试验机，使压头与上下压条接触，荷载不超过 30N，迅速调整好数据采集系统或 X-Y 记录仪到零点位置。

3.2.5 开动数据采集系统或记录仪，同时启动试验机，以规定的加载速率向试件加载间接拉伸至破坏，记录仪记录荷载及水平变形（或垂直位移）。当试验机无环境保温箱时，自恒温水槽中取出试件至试验结束的时间应不超过 45s。记录的荷载—变形曲线如图 B.4 所示。

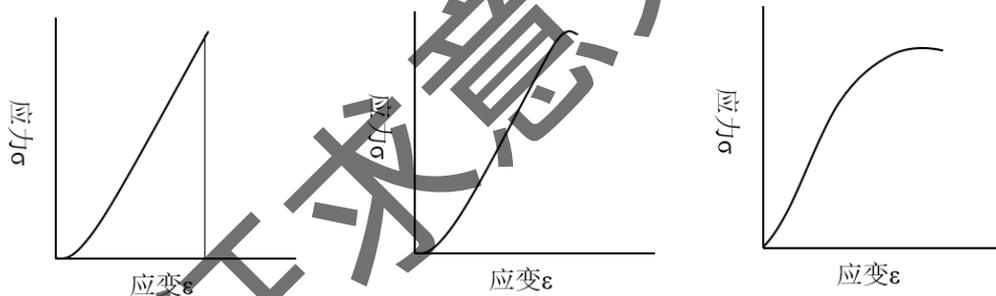


图 B.4 间接拉伸试验的荷载-变形曲线

4 计算

4.1 将图 B.4 中的荷载—变形曲线的直线段按图示方法延长与横坐标相交作为曲线原点，由图中量取峰值时的最大荷载 P_T 及最大变形 (Y_T 或 X_T)。

当试件直径为 $100\text{mm} \pm 2.0\text{mm}$ 、压条宽度为 12.7mm 及试件直径为 $150.0\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 、压条宽度为 19.0mm 时，间接拉伸抗拉强度 S_{ii} 分别按式(B.3)及(B.4)计算，泊松比 μ 、破坏拉伸应变 ε_T 及破坏劲度模量 S_T 按式(B.5)、(B.6)、(B.7)计算。

$$S_{ii} = 0.006287P_T / h \quad (\text{B.3})$$

$$S_{it} = 0.00425P_T / h \quad (\text{B.4})$$

$$\mu = (0.1350A - 1.7940) / (-0.5A - 0.0314) \quad (\text{B.5})$$

$$\varepsilon_T = X_T \times (0.0307 + 0.0936\mu) / (1.35 + 5\mu) \quad (\text{B.6})$$

$$S_T = P_T \times (0.27 + 0.1\mu) / (h \times X_T) \quad (\text{B.7})$$

式中： S_{it} ——间接拉伸抗拉强度，MPa；

ε_T ——破坏拉伸应变；

S_T ——破坏劲度模量，MPa；

μ ——泊松比；

P_T ——试验荷载的最大值，N；

h ——试件高度，mm；

A ——试件垂直变形与水平变形的比值($A=Y_T/X_T$)；

Y_T ——试件相应于最大破坏荷载时的垂直方向总变形，mm；

X_T ——按图B.4的方法量取的相应于最大破坏荷载时的水平方向总变形，mm。当试验仪测定垂直方向变形 Y_T 或由实测的 Y_T 、 X_T 计算的 μ 值大于0.5或小于0.2时，水平变形(X_T)可由表B.2规定的泊松比(μ)按式(B.8)求算。

$$X_T = Y_T \times (0.135 + 0.5\mu) / (1.794 - 0.0314\mu) \quad (\text{B.8})$$

4.2 需要计算加载过程中任一加载时刻的应力、应变、劲度模量的方法同上，只需读取该时刻的荷载及变形代替上式的最大荷载及破坏变形即可。

4.3 当记录的荷载—变形曲线在小变形区有一定的直线段时，可以试验的最大荷载 P_T 的0.1~0.4范围内的直线段部分的斜率计算弹性阶段的劲度模量，或以此范围内各测点的应力 σ 、应变 ε 数据计算的 $S = \sigma / \varepsilon$ 的平均值作为劲度模量，并以此作为路面设计用的力学参数。 σ 、 ε 及 S 的计算方法同本规程中的 R_T 、 ε_T 、 S_T 的计算方法。

5 报告

5.1 当一组测定值中某个数据与平均值之差大于标准差的 k 倍时，该测定值应予舍弃，并以其余测定值的平均值作为试验结果。当试验数目 n 为3、4、5、

6个时， k 值分别为 1.15、1.46、1.67、1.82， k 的取值见表B.3

表B.3 有效试件数与 t 值的关系

有效试件数 n	临界值 k	t/\sqrt{n}	
		保证率 95%	保证率 90%
3	1.15	1.686	1.089
4	1.46	1.177	0.819
5	1.67	0.954	0.686
6	1.82	0.823	0.603
7	1.94	0.734	0.544
8	2.03	0.670	0.500
9	2.11	0.620	0.466
10	2.18	0.580	0.437

条文说明

沥青混合料的间接拉伸试验是对规定尺寸的圆柱体试件，通过一定宽度的圆弧形压条施加荷载，将试件间接拉伸直至破坏的试验。国外试验规程中，ASTM D 4123 是用动载测定劲度模量(AASHTO 设计指南规定以此作为设计用回弹模量)；日本道路协会铺装试验法便览 3-7-6 则是采取静载间接拉伸求取间接抗拉强度，目的在于评价高温抗车辙能力及低温抗裂性能；英国、澳大利亚目前采用诺丁汉试验机冲击荷载试验小变形时的劲度模量；第 18 届世界道路会议则推荐用来测定抗拉强度和变形性能。可见间接拉伸试验在国外有两种目的：一是采用动载或冲击法求取设计参数回弹模量；二是用静载试验评价沥青混合料的性质。本试验根据国内外研究成果及试验方法编制，适用于测定破坏时的间接抗拉强度、极限拉伸应变、破坏劲度模量，又可用于求取弹性阶段的劲度模量作为设计参数使用。

关于试件保温的仪器，鉴于目前试验中对试件的保温基本都采用恒温水槽保温，采用冰箱保温，试验的温度很难控制，将导致数据不准确，因此本次修订对保温的仪器去掉了原来可以采用的冰箱保温。另外，圆孔筛已经不采用了，去掉了圆孔筛 30mm 的尺寸。在方法与步骤中对记录仪的走纸速度 500mm/min~5000 mm/min 可能不合适，修改为由试验温度确定走纸速度。

间接拉伸试验采用的试件尺寸，通常为 $\phi 101 \times 100$ mm 的 1:1 圆柱体，但美

国、日本、英国、澳大利亚等目前基本上都采用 $\phi 101.6\text{mm} \times 63.5\text{mm}$ 的标准马歇尔试件，英国则采用 $\phi 150\text{mm}$ 的现场钻取试件，厚 $40\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 。本试验法规定采用标准马歇尔试件，同时也可采用现场钻取的 $\phi 100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 及 $\phi 150\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 试件，规定厚度为 $40\text{mm} \pm 5\text{mm}$ ，是参考美国标准及路面实际情况决定的。

试件的加载速度 1983 年试验规程规定为 $1\text{mm}/\text{min}$ ，国外除采用动载试验外，静载试验时大都采用 $50\text{mm}/\text{min}$ (如日本道路协会铺装试验法便览、AASHTO T 283)。第 18 届世界道路会议报告推荐的速度 -10°C 时为 $0.30\text{mm}/\text{s} \pm 0.1\text{mm}/\text{s}$ ， $+25^\circ\text{C}$ 及 $+45^\circ\text{C}$ 时为 $0.85\text{mm}/\text{s} \pm 0.1\text{mm}/\text{s}$ ，即 $18\text{mm}/\text{min}$ 或 $51\text{mm}/\text{min}$ 。并要求试验从开始至破坏的时间不超过 30s 。因此本试验法规定加载速度根据试验目的或有关规定选用，并推荐采用 $50\text{mm}/\text{min}$ 的标准加载速率。这样也和其它混合料试验方法的速率相同。

但是试验目的不同，加载速率也应该不同。美国 SHRP 的研究表明，为评价低温性能，常用较慢的速率，以模拟气候降温的收缩应力作用的情况，如 $0.05\text{in}/\text{min}$ ，故本方法规定加载速率采用 $1\text{mm}/\text{min}$ 时，此时的试验温度为 -10°C 。

试验温度各国更不相同，ASTM D 4123 用动载试验时采用 5°C 、 25°C 、 40°C 三个温度，第 18 届道路会议报告推荐在 -10°C 、 25°C 、 40°C 温度下进行，其它温度也可选用。日本规定在 $-10^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 范围内根据试验目的选用。本方法规定间接拉伸试验有两个目的，在什么温度下评价沥青混合料的性能应视目的而定。我国幅员辽阔，各地的设计温度本身就是一个有待研究的问题。本方法推荐了相对于荷载疲劳破坏的设计参数及低温收缩开裂破坏的试验温度，可供目前试验时使用。

间接拉伸试验在计算劲度模量时，必须使用泊松比 μ 值。它可以由测定的垂直变形及水平变形求取，这曾经是 60、70 年代许多国家的研究重点，经大量测定，得出了一些 μ 的推荐值。经近年来我国实际测定证明，仅从单个试件本身的变形测定值计算的 μ 往往出现异常的情况，因此本试验法规定参照英国、澳大利亚、荷兰等国家用诺丁汉试验机测定劲度模量时的 μ 值用于计算，这样变形只需测定垂直或水平变形中的一个。但也可以由实测的垂直变形及水平变形计算，不过此时计算的 μ 值必须在 $0.2 \sim 0.5$ 范围内，超出此范围说明变形测定很可能有

误差，此时大多是水平变形不准，则可以仅采用垂直变形计算劲度模量。

间接拉伸试验采用的压条对试验结果及计算模式均有影响。AASHTO T 283 规定对 $\phi 102\text{mm}$ 试件压条宽度 12.7mm，对 $\phi 152.4\text{mm}$ 试件用 19.05mm 的压条，压条边际是磨圆的。也可不用压条，因为只要求测定强度(半径未作规定)。但美国等不少国家大都通用 12.7mm 的压条，日本学者也有采用 25.4mm 压条的，都是圆弧形的。但 18 届道路会议论文集推荐最好不用压条，如果采用压条则为试件宽度的 1/5。日本道路协会试验法也未用压条，这显然与试验法仅为测定强度而不测定模量有关。为此本试验法与国外大多数试验法统一规定，采用 12.7mm 宽的圆弧形压条，对 $\phi 150\text{mm}$ 的试件按比例采用 19.0mm 压条，使压条的圆心角相同，为防止边缘的局部嵌入，加工应该磨圆。

关于试验的精度与允许误差，国外许多规程未作规定，第 18 届道路会议报告提到其变异系数为 5%~10%(重复性)及 10%~20% (再现性)，由于我国尚缺乏这方面的经验和资料，本试验法暂不作规定，仅规定取所有试验的平均值为测定结果。

B.4 无机结合料稳定类材料抗拉强度

1 目的与适用范围

本试验方法是通过对路面材料试件施加一个单向的轴拉应力，测量其拉伸模量值，该试验方法有助于路面结构分析。

2 仪器与材料技术要求

2.1 拉伸试验机，能施加线性加载；

2.2 测力传感器，满足在 50N-200N 之间测量精度为 5%，在 200N 以上测量精度为 1%。

3 试验准备

3.1 试样的准备

振动成型 100mm×100mm×400mm 的中梁试件，拉伸试验试件由上至下依次为上夹持段、上过渡段、拉伸段、下过渡段和下夹持段；其中，所述拉伸试验试件各截面的厚度相等，截面宽度从所述拉伸段到所述上夹持段和所述下夹持段逐渐增大；上过渡段两侧面设置为圆弧，弧面与预定破坏段的两侧面平滑过渡，下过渡段两侧面设置为圆弧，弧面与预定破坏段的两侧面平滑过渡。

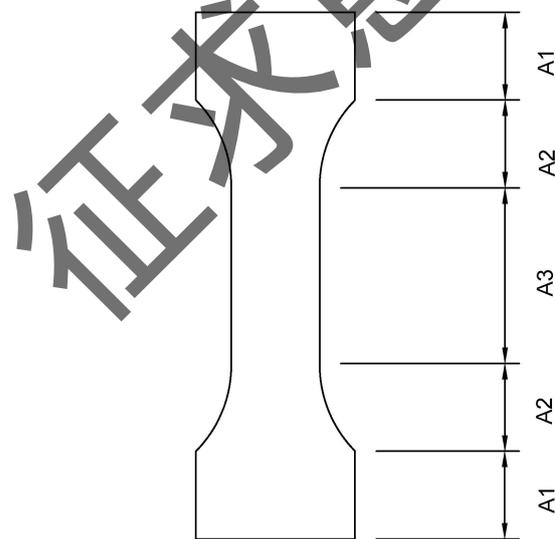


图 B.5 路面材料直接拉伸试验试件的结构示意图

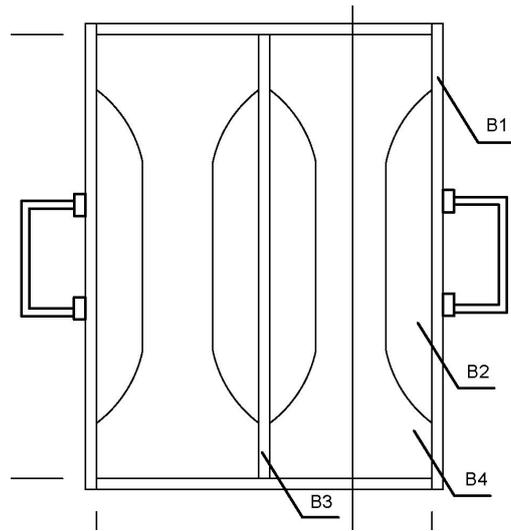


图 B.6 路面材料直接拉伸试验试件成型模具的装配图

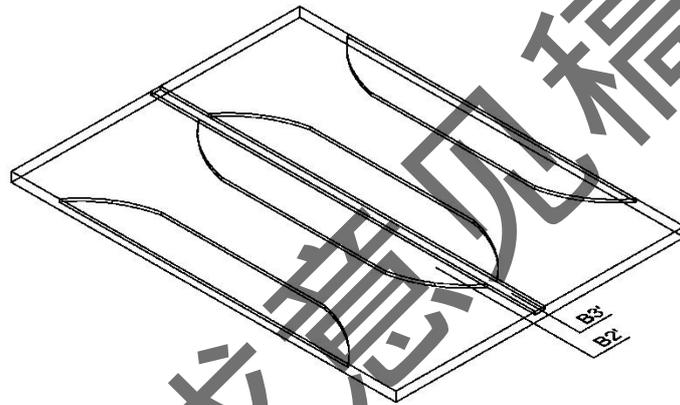


图 B.7 路面材料直接拉伸试验试件成型模具底板上限位槽示意图

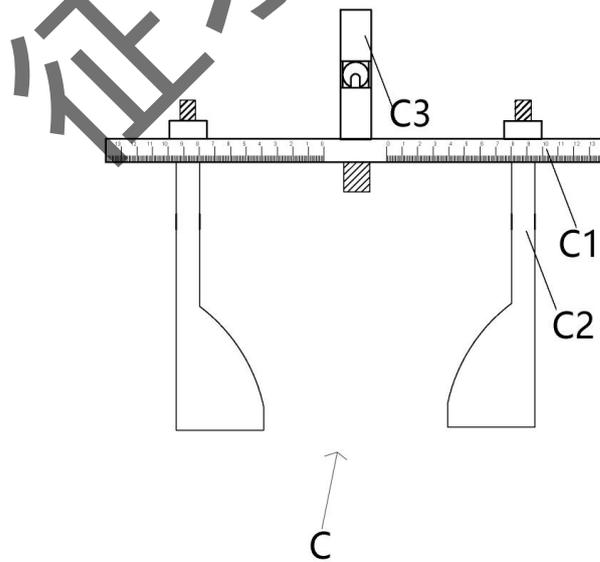


图 B.8 路面材料直接拉伸试验上部夹具结构示意图

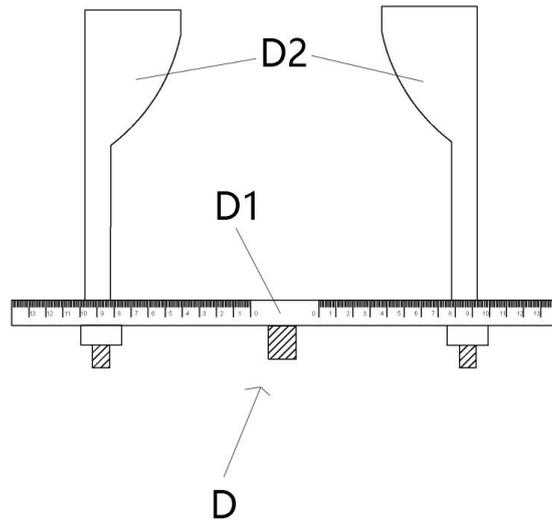


图 B.9 路面材料直接拉伸试验下部夹具结构示意图

4 试验步骤

4.1 试验前将所述下部夹具的下标尺梁通过螺丝与试验机连接，然后装上一对下夹持板，通过螺帽将下夹持板固定于下标尺梁上的某一位置上。

4.2 将上部夹具的球铰连接杆连接到试验机上，通过螺丝将上标尺梁与球铰连接杆连接，再装上一对上夹持板，通过螺帽将上夹持板固定于上标尺梁上的某一位置。

4.3 将制备好的所述路面材料直接拉伸试件装于上部夹具和下部夹具之间，并通过微调试验机，使得上述试件与上部夹具、下部夹具位置对应；若返现上述试件的位置并不居中，可调节上夹持板或下夹持板的位置，使上述试件处于拉伸的正中位置。

4.4 启动试验机，开始试验，直至上述试件被拉断，然后分别松开上夹持板、下夹持板，取出拉断试件，保存数据。

4.5 取第二个试件，安装步骤 4.1-4.4 进行安装，并进行重复试验，直至测试完所有上述试件。环氧树脂胶粘的路面材料直接拉伸试验，试验结果如表 B.3 所示。

表 B.3 路面材料直接拉伸强度试验结果

试验方法	加载速率 $v/\text{MPa/s}$	强度 S_i/MPa	强度均值 S_f/MPa	变异系数
本方法	5	2.781	2.950	0.062
		3.142		
		2.927		
		2.896		
		2.841		
		3.025		
		2.902		
		3.014		
		3.027		
环氧树脂胶粘法	5	2.231	2.529	0.133
		2.894		
		2.463		
		2.675		
		2.498		
		2.366		
		2.522		
		2.344		
		2.772		

从试验结果可以看出，本方法的路面材料直接拉伸试验法得到的强度的变异系数比环氧树脂胶粘法的小，环氧树脂胶粘法得到的拉伸强度的变异系数是本方法试验法的 2 倍左右，本方法的路面材料直接拉伸试验有效消除了试件变截面处的应力集中，消除了偏心应力，控制了试件破坏面基本处于试件中部，使测试结果更精确。

B.5 无机结合料稳定类材料抗压强度试验参照规范《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009) T 0805-1994 执行。

征求意见稿

B.6 无机结合料稳定类材料间接拉伸强度试验参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009) T 0806-1994 执行。

征求意见稿

B.7 路面材料三维强度模型的计算方法及计算示例

通过直接拉伸试验、单轴压缩试验和间接拉伸试验分别得到强度 S_t 、 S_c 和 S_{it} 及下表所示的强度参数；或通过直接拉伸、单轴压缩、围压三轴拉伸试验，分别得到强度 S_t 、 S_c 和 $S_{tri}(\sigma_1, -\sigma_3, -\sigma_3)$ 。

表 B.7-1 路面材料直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸及围压三轴拉伸试验结果及强度参数

试验类型	强度 /MPa	第一主应力 σ_1 /MPa	第二主应力 σ_2 /MPa	第三主应力 σ_3 /MPa	第一应力不变量 I_1 /MPa	有效应力 σ_e /MPa	洛德角 $\theta/^\circ$
直接拉伸	S_t	S_t	0	0	S_t	S_t	0
单轴压缩	S_c	0	0	$-S_c$	$-S_c$	S_c	60
间接拉伸	S_{it}	S_{it}	0	$-3S_{it}$	$-2S_{it}$	$\sqrt{13}S_{it}$	46.10
围压三轴拉伸	S_{tri}	σ_1	$-\sigma_3$	$-\sigma_3$	$\sigma_1 - 2\sigma_3$	$\sigma_1 + \sigma_3$	0

按下式计算路面材料的三维强度：

$$\text{拉伸子午线： } \sigma_e^t/S_c = a - b(I_1/S_c) \quad (\text{B.7.1-1})$$

$$\text{压缩子午线： } \sigma_e^c/S_c = m[a - b(I_1/S_c)] \quad (\text{B.7.1-2})$$

$$\text{破坏包络线： } \sigma_e(\theta) = \sigma_e^t - (\sigma_e^t - \sigma_e^c)3\theta/\pi \quad (\text{B.7.1-3})$$

式中：

$$\sigma_e \text{——有效应力： } \sigma_e = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}/\sqrt{2} \quad (\text{B.7.1-4})$$

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——分别为材料破坏时第一、第二、第三主应力；

θ ——罗德角：

$$\cos \theta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}} \quad (\text{B.7.1-5})$$

$$I_1 \text{——第一应力不变量： } I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3; \quad (\text{B.7.1-6})$$

S_t ——直接拉伸强度；

S_c ——单轴压缩强度；

S_{it} ——间接拉伸强度；

S_{tri} ——围压三轴拉伸强度；

a, b, m ——三维强度模型参数。

B.7.1 直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸试验确定三维强度模型参数方法

开展直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸强度试验，得到表 B.7.1-1 中的强度参数，将强度试验结果联立代入式 B.7.1-1、B.7.1-2、B.7.1-3 求得三维强度模型参数 a, b, m ，具体计算步骤如下：

(1) 将直接拉伸强度 S_t 、单轴压缩强度 S_c 、间接拉伸强度 S_{it} ，代入下式 (B.7.1-7) 求解参数 k_1, k_2 和 k_3 ：

$$\begin{cases} k_1 = \frac{3\theta}{\pi} S_t (S_c - 2S_{it}) \\ k_2 = \frac{6\theta}{\pi} (S_t + S_c) S_{it} + S_t (S_c - 2S_{it}) - \sqrt{13} S_{it} (S_t + S_c) \\ k_3 = (1 - \frac{3\theta}{\pi}) S_c (S_t + 2S_{it}) \end{cases} \quad (\text{B.7.1-7})$$

(2) 通过参数 k_1, k_2 和 k_3 ，得到参数 m 的解：

$$m = \frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4k_1k_3}}{2k_1} \quad (\text{B.7.1-8})$$

(3) 将 m 代入式 B.7.1-9、B.7.1-10，求解参数 a, b ：

$$a = \frac{\frac{S_t}{m} + S_t}{S_t + S_c} \quad (\text{B.7.1-9})$$

$$b = \frac{\frac{S_c}{m} - S_t}{S_t + S_c} \quad (\text{B.7.1-10})$$

式 B.7.1-9、B.7.1-10、B.7.1-8 即为三维强度模型参数 a, b, m 的计算方法。

B.7.2 直接拉伸、单轴压缩、围压三轴拉伸试验确定三维强度模型参数方法

开展直接拉伸、单轴压缩、围压三轴拉伸强度试验，得到表 B.7.1-1 中的强度参数，将强度试验结果分别代入式 B.7.1-1、B.7.1-2、B.7.1-1 求得三维强度模型参数 a ， b ， m ，具体计算步骤如下：

(1) 将直接拉伸强度 S_t 和围压三轴拉伸强度 S_m 的三向主应力值代入式 B.7.1-4 和 B.7.1-6，得到两组有效应力 σ_e 和第一应力不变量 I_1 ，代入式 B.7.1-1 得：

$$a = \frac{3S_t\sigma_3}{S_c(S_t - \sigma_1 + 2\sigma_3)} \quad (\text{B.7.2-1})$$

$$b = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - S_t}{S_t - \sigma_1 + 2\sigma_3} \quad (\text{B.7.2-2})$$

(2) 将参数 a 和 b 代入式 B.7.2-3，得到参数 m 的解：

$$m = 1/(a+b) \quad (\text{B.7.2-3})$$

式 B.7.2-1、B.7.2-2、B.7.2-3 即为三维强度模型参数 a ， b ， m 的计算方法。

B.7.3 计算示例

(1) 通过相同加载速度的直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸试验获得表 B.7.3-1 所示的路面材料的极限强度值。

表 B.7.3-1 路面材料的极限强度值

试件编号	沥青混合料强度			无机结合料强度		
	直接拉伸 S_t	单轴压缩 S_c	间接拉伸 S_{it}	直接拉伸 S_t	单轴压缩 S_c	间接拉伸 S_{it}
1	5.306	25.034	3.685	1.228	9.331	1.042
2	5.035	25.882	3.587	1.096	9.460	1.214
3	5.181	24.897	3.801	1.152	10.383	1.085
4	5.513	25.171	3.861	1.183	10.775	1.113
5	5.241	25.083	4.171	1.212	9.950	1.192
平均值	5.255	25.213	3.821	1.174	9.980	1.129

(2) 将表 B.7.3-1 中的直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸强度的试验数据，代入下式 B.7.3-1 求解参数 k_1 、 k_2 和 k_3 ：

$$\begin{cases} k_1 = \frac{3\theta}{\pi} S_t (S_c - 2S_{it}) \\ k_2 = \frac{6\theta}{\pi} (S_t + S_c) S_{it} + S_t (S_c - 2S_{it}) - \sqrt{13} S_{it} (S_t + S_c) \\ k_3 = (1 - \frac{3\theta}{\pi}) S_c (S_t + 2S_{it}) \end{cases} \quad (\text{B.7.3-1})$$

(3) 通过参数 k_1 、 k_2 和 k_3 ，可以得到参数 m 的解为：

$$m = \frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4k_1k_3}}{2k_1} \quad (\text{B.7.3-2})$$

(4) 将 m 代入式 (B.7.3-3)，求解参数 a 、 b ：

$$\begin{cases} a = \frac{\frac{S_t + S_c}{S_t + S_c} m}{S_t + S_c} \\ b = \frac{\frac{S_c - S_t}{S_t + S_c} m}{S_t + S_c} \end{cases} \quad (\text{B.7.3-3})$$

(5) 求得三维强度参数结果 a 、 b 、 m ，如表 B.7.3-2 所示，将模型参数代入公式 B.7.1-1、B.7.1-2、B.7.1-3 即为三维强度模型。

表 B.7.3-2 三维强度模型参数求解结果

参数	a	b	m
沥青混合料	0.312	0.496	1.237
无机结合料	0.163	0.387	1.818

附录 C 路面材料疲劳参数试验方法

C.1 适用范围

C.1.1 本方法适用于采用简单应力状态下强度和疲劳试验获取路面材料疲劳参数。

C.1.2 简单应力状态试验可以是单轴压缩、直接拉伸、间接拉伸中的一种或多种。

C.2 仪器设备

C.2.1 采用 MTS、UTM 或者其他同类设备进行路面材料强度和疲劳强度测试，如图 C.2.1 所示。



图 C.2.1 强度与疲劳试验机

C.2.2 试验系统：包括试验仪器、温控箱和测量系统。

C.2.3 测量系统：由计算机控制，能够测量和记录随时间变化的施加荷载和轴向变形情况。

C.2.4 加载应为顶部加载模式，宜采用闭路电液压或电气压装置，应能够产生图 C.2.4 所示的重复循环半正矢脉冲荷载，荷载波形应能实时显示。

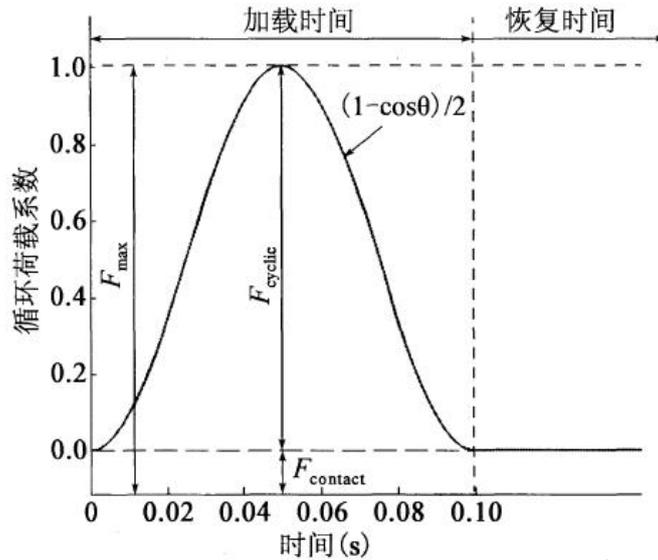


图 C.2.4 半正矢形加载波

C.2.5 数据测量及采集系统：采用微机控制，能测量并记录试件在每个加载循环中所承受的轴向荷载和产生的轴向变形。荷载传感器所需最小量程为 0~25kN，分辨力不大于 5N，误差不大于 1%；位移传感器可采用 LVDT 或其它合适的设备，其量程应大于 1mm，分辨率不大于 0.2 μ m，误差不大于 2.5 μ m。

C.2.6 环境箱：控温范围-10~60 $^{\circ}$ C，控温准确度为 \pm 0.5 $^{\circ}$ C，且具有一定的容量，至少能存放 3 个试件。

C.2.7 加载板：可采用硬质钢板或经处理过的高强度铝板，直径等于或大于试件的直径，分别置于试件的底部和顶部，用来将荷载从试验机传递给试件。

C.2.8 旋转压实仪：成型高度 100 \pm 2mm，直径为 100 \pm 2mm 的沥青混合料圆柱体试件。

C.2.9 切割机：将尺寸为 400mm \times 300mm \times 50mm 碾压成型的试样板切割成 250 \times 50 \times 50mm 的梁式试件。

C.2.10 钻机：从旋转压实仪成型试件中钻取直径为 100mm 的芯样，要求将钻机及取芯试件固定，钻头与地面垂直。

C.2.11 振动搅拌机：开启搅拌机调至常规搅拌状态，依次将矿料、水泥、水加入后，开启振动模式搅拌 40s 后装入试模进行振动成型。

C.3 试件准备

C.3.1 按目标配合比拌制沥青混合料，在规定的拌和温度下拌和均匀后，用旋转压实仪成型 150 \times 170mm（高）的试件。

C.3.2 采用钻机从旋转压实仪成型的试件中钻取直径为 100mm~102mm 的芯样，作为单轴压缩试验试件，在此基础上，进一步切割试件为高度 $60\pm 2\text{mm}$ ，直径 $100\pm 2\text{mm}$ 的圆柱体，作为间接拉伸试验试件。在取芯时应充分固定钻机和取芯试件，钻头与地面垂直，同时保证取芯试件水平放置，调整合适的钻头旋转速度和下降速度，以确保钻取的芯样呈圆柱体，形状规则，周边面光滑且与两个端面垂直。

C.3.3 采用切割机切除所取芯样两端，保证试件高度为 $100\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 。将试件固定，保证试件的轴向与锯片垂直，合理调整切割机锯片旋转速度和试件推进速度，以确保试件的两个切割端面平行，且表面平滑无沟纹。对端面平整度要求为沿任何直径方向沟纹高差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内。保证试件的两个端面与试件轴向垂直，当垂直偏差超过 1° 时应舍弃该试件。

C.3.4 沥青混合料直接拉伸疲劳试件用切割机将尺寸为 $400\text{mm}\times 300\text{mm}\times 50\text{mm}$ 碾压成型的试样板切割成 $250\times 50\times 50\text{mm}$ 的梁式试件。

C.3.5 无机结合料稳定类材料单轴压缩和间接拉伸疲劳试验采用高度为 150mm、直径为 150mm 的圆柱体试件，直接拉伸疲劳试件采用振动成型 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ 的中梁试件。

C.3.6 正式试件制备。根据预备试件制备得到的混合料标准用量按上述步骤制备并量测试件，保证有效试件不少于 4 个。

C.3.7 试件贮存。试件制备后两天内如不进行试验，需用聚乙烯薄膜将试件包裹好，在温度为 $5^\circ\text{C}\sim 27^\circ\text{C}$ 环境下保存，时间不宜超过两周，存放时试件不可堆叠。将符合要求的水泥稳定碎石试件小心移至养生室，并根据现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTG E51-2009）T 0845 规定对试件进行标准养生或快速养生。

C.4 试验步骤

C.4.1 沥青混合料单轴压缩疲劳试验

- (1) 先成型高度为 $100\pm 2\text{mm}$ ，直径 $100\pm 2\text{mm}$ 的圆柱体试件，在此基础上切割为高度 $60\pm 2\text{mm}$ ，直径 $100\pm 2\text{mm}$ 的圆柱体；
- (2) 在试件侧面中部安置好两个 LVDT 位移传感器；
- (3) 将圆柱体试件放置于加载板，试件上下端部各放一块聚四氟乙烯薄膜，

以疲劳试验峰值的 10%进行预压；

(4) 用恒温箱将试件封闭在温控室，调设温度为 15°C，恒温 4~5 小时后使用 MTS-Landmark 开始疲劳试验。

C.4.2 沥青混合料直接拉伸疲劳试验

(1) 将尺寸为 400mm×300mm×50mm 碾压成型的试样板切割成 250×50×50mm 的梁式试件；

(2) 采用固态配比钢胶胶结直接拉伸梁氏试件与模具；

(3) 采用 MTS-Landmark 材料试验系统在恒温箱 15°C 的条件下进行疲劳试验。试验数据通过数据系统自动采集，将采集到的数据输入 MATLAB 编程软件进行力学参数计算。

C.4.3 沥青混合料间接拉伸疲劳试验

(1) 先成型高度为 100±2mm，直径 100±2mm 的圆柱体试件，在此基础上切割为高度 60±2mm，直径 100±2mm 的圆柱体；

(2) 确定试件前后两个截面的中心位置，水平径向引伸计和竖直径向引伸计应保持空间垂直，而且需保证两个引伸计的刀口中心能被两侧的截面中心（亦是圆心）均分；

(3) 将试件置于温控箱中，温度恒定为 15°C，启动 MTS 加载系统，由 MTS 直接采集疲劳寿命，由 LVDT 位移传感器采集应力应变。

C.4.4 无机结合料稳定类材料单轴压缩疲劳试验

(1) 成型高度为 150mm、直径为 150mm 的圆柱体试件。

(2) 试件养生至龄期的前一天，将试件泡水一昼夜后进行试验，将泡水试件取出用干毛巾擦拭表面的水分，将试件中部用磨砂纸打磨后，将 LVDT 位移传感器竖向粘贴在试件两侧，并与试件侧面垂直。为减小测量误差，尽量使传感器压头在试件中部 60mm，离上下表面均 45mm。

(3) 将位移传感器固定好之后，缓慢移置 MTS 试验压头上，连接好传感器接头，并保证试件与仪器压头处于中心位置，以减小压头的偏移造成的试件受力不均。

(4) 放置完试件后，将 MTS 设备开启，调制好试验参数，并先将上压头缓慢接触试件，保证位移传感器、设备的施压处于正常状态，试验开始时先进

行预压，保证设备与试件完全接触后清零，设置不同应力水平的强度参数进行疲劳试验。

C.4.5 无机结合料稳定类材料直接拉伸疲劳试验

- (1) 成型 400×100×100mm 的梁式试件；
- (2) 采用固态配比钢胶胶结直接拉伸梁氏试件与模具；
- (3) 采用 MTS-Landmark 材料试验系统在恒温箱 15℃的条件下进行疲劳试验。试验数据通过数据系统自动采集，将采集到的数据输入 MATLAB 编程软件进行力学参数计算。

C.4.6 无机结合料稳定类材料间接拉伸疲劳试验

- (1) 成型高度为 150mm、直径为 150mm 的圆柱体试件。
- (2) 按照间接拉伸疲劳试验方法（JTG E51-2009），将圆柱形试件安置试验夹具的夹条上，上下对中，以防荷载加载沿两边时发生偏移。在试件两端粘贴位移传感器，一端测试水平位移，一端测试竖向位移。与单轴压缩疲劳试验同理，调整好试验参数，并以 0.2 强度比应力水平预压 2min，根据强度试验结果，设置不同应力水平的强度参数进行疲劳试验。

C.5 归一化模型建立与疲劳参数获取

C.5.1 有效应力表征的三维应力状态下路面材料疲劳应力比 Δ

路面材料疲劳应力比按照下列方法确定：

- (1) 拟定相应的疲劳试验应力水平 σ_i ，并计算初始有效应力 σ_{ei} ，见表 C.5.1-1；

表 C.5.1-1 路面材料单轴压缩、直接拉伸及间接拉伸疲劳试验初始有效应力

试验类型	应力水平 σ_i /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	I_1 /MPa	σ_{ei} /MPa
直接拉伸	σ_t	σ_t	0	0	σ_{it}	σ_t
单轴压缩	σ_c	0	0	$-\sigma_c$	$-\sigma_{ic}$	σ_c
间接拉伸	σ_d	σ_d	0	$-3S_{it}$	$-2S_{it}$	$\sqrt{13}\sigma_d$

- (2) 进行与疲劳试验应力水平相对应加载速率下的强度试验，得到强度

S_i 。强度加载速率 $v=2f\sigma_i$ ，其中： v 为加载速率， f 为加载频率。

并计算强度破坏时对应的有效应力 σ_{es} ，见表 C.5.1-2。

表 C.5.1-2 路面材料单轴压缩、直接拉伸及间接拉伸强度破坏有效应力

试验类型	强度 S_i /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	I_1 /MPa	σ_{es} /MPa
直接拉伸	S_t	S_t	0	0	S_t	S_t
单轴压缩	S_c	0	0	$-S_c$	$-S_c$	S_c
间接拉伸	S_{it}	S_{it}	0	$-3S_{it}$	$-2S_{it}$	$\sqrt{13}S_{it}$

(3) 以初始有效应力 σ_{ei} 除以其强度破坏对应的有效应力 σ_{es} 作为三维应力状态下的疲劳试验应力比 Δ ，见表 C.5.1-3。

表 C.5.1-3 路面材料单轴压缩、直接拉伸及间接拉伸疲劳试验应力比

试验类型	σ_{ei} /MPa	σ_{es} /MPa	Δ
直接拉伸	σ_t	S_t	σ_t/S_t
单轴压缩	σ_c	S_c	σ_c/S_c
间接拉伸	$\sqrt{13}\sigma_{it}$	$\sqrt{13}S_{it}$	σ_{it}/S_{it}

C.5.2 单轴压缩、直接拉伸、间接拉伸疲劳寿命 N_f

在拟定的疲劳应力比条件下，进行单轴压缩、直接拉伸、间接拉伸疲劳试验，分别得到路面材料在不同应力状态下的疲劳寿命 N_f 。

C.5.3 三维应力状态下路面材料疲劳归一化模型及其参数

以疲劳应力比 Δ 为横坐标，疲劳寿命 N_f 为纵坐标，在双对数坐标系中进行线性拟合，得到三维应力状态下路面材料疲劳性能表征的归一化模型，如式 C.5.3 所示，并获得路面材料疲劳归一化模型参数 γ 。

$$N_f = (\Delta)^{-\gamma} \quad (C.5.3)$$

C.6 试验报告

C.6.1 沥青混合料参数：沥青含量、矿料级配、密度、空隙率及试件尺寸。

C.6.2 试验参数：三种简单应力状态下沥青混合料三维应力状态下归一化疲劳模型及其参数。

C.6.3 水泥稳定碎石参数：水泥剂量、矿料级配、密度、空隙率及试件尺寸。

C.6.4 试验参数：三种简单应力状态下水泥稳定碎石三维应力状态下归一化疲劳模型及其参数。

征求意见稿

附录 D 路基回弹模量标准试验方法

D.0.1 本试验方法适用于利用动三轴试验仪在规定的加载条件下测定路基土与粒料的动态回弹模量。

D.0.2 动三轴试验仪装置应符合下列规定：

1 三轴压力室应采用聚碳酸酯、丙烯酸或其他适宜的透明材料制成，宜采用空气作为测压流体。

2 加载装置应采用能够产生重复循环半正矢脉冲荷载的顶部加载式、闭路电液或电气压试验机。施加荷载的频率为 0.1~25Hz，且施加的最大轴向动应力水平应不小于 150kPa。

3 数据测量及采集应采用计算机控制，能测量并记录试件在每个加载循环中所承受的荷载和产生的轴向变形。三轴室压力可采用压力表、压力计或压力传感器监测，量程不应小于 200kPa，精确不应低于 1.0kPa；轴向荷载传感器量程应不小于 25kN，分辨力应不低于 5N；位移传感器可采用 LVDT 或其他合适的设备，应具有良好的动态响应特性，量程应大于 6mm，分辨力应不大于量程的 1%。

D.0.3 试验准备工作应符合下列规定：

1 试件成型应符合下列规定：

1) 现场取土应采用薄壁试管取样；

2) 最大粒径大于 19mm 的路基土与粒料，应筛除大于 26.5mm 的颗粒，采用振动或冲击压实成型；

3) 最大粒径不超过 9.5mm，且 0.075mm 筛通过百分率小于 10% 的路基土，应采用振动压实成型；

4) 最大粒径不超过 9.5mm，且 0.075mm 筛通过百分率不小于 10% 的路基土，应采用冲击或静压压实成型。

2 试件尺寸应符合下列规定：

1) 现场取土试样的长度应不小于试件直径的 2 倍；

2) 最大粒径大于 19mm 的路基土与粒料，试件尺寸应符合直径 150mm±2mm、高 300mm±2mm 的要求；

3) 最大粒径不超过 19mm 的路基土与粒料，试件尺寸应符合直径

100mm±2mm、高 200mm±2mm 的要求。

3 室内压实成型试件含水率应符合目标含水率值±0.5%，压实度应符合目标压实度值±1.0%。

4 对于较硬的黏性试件(不排水抗剪强度大于 36kPa，模量一般大于 70MPa)，可采用石膏浆调和端部的表面缺陷，处理厚度不应超过 3mm。

5 一组试验不应少于 3 个平行试件。

D.0.4 试验步骤应符合下列规定：

1 在试件上套装橡皮膜，保证密封不透气。

2 将试件放置在预浸的湿润多孔透水石和底部压盘上，并在顶部加放预浸的湿润透水石和顶部压盘。当存在透水石堵塞时，应在试件与透水石之间放置预浸的湿润滤纸。

3 将组装好的试件置于三轴室基座的中心位置，并保证试件中心与加载架的中心对齐。

4 安装位移传感器。当采用上下顶端式测量装置时，应将 LVDT 或位移传感器附于钢条或铝棒(介于试件顶盖与底部压盘之间)上；当采用光学变形测量仪时，应将 2 个指示标直接附于试件上，每个指示标至少采用 2 个小别针定位；当采用夹持式测量装置时，应将夹具置于试件 1/4 高度处。对不排水抗剪强度小于 36kPa 的较软试件，不应采用置于试件上的夹持式测量装置。

5 打开排水管阀门，连通围压供给管和三轴室，对试件施加 30.0kPa 预载围压，并对试件施加至少 1000 次、最大轴向应力为 66.0kPa 的半正矢脉冲荷载。当试件总的垂直永久应变达到 5%时，预载停止，应分析原因或重新制备试件。

6 调整围压和半正矢脉冲荷载至目标设定值，以 10Hz 的频率重复加载 100 次。试验采集最后 5 个波形的荷载及变形曲线，记录并计算试验施加荷载、试件轴向可恢复变形、动态回弹模量。加载过程中，若试件总的垂直永久应变超过 5%，应停止试验并记录结果。

D.0.5 试验成果计算应符合下列规定：

1 应力幅值应按式(D.0.5-1)计算确定：

$$\sigma_0 = \frac{P_i}{A} \quad (\text{D.0.5-1})$$

式中： σ_0 ——轴向应力幅值(MPa)；

P_i ——最后 5 次加载循环中轴向试验荷载平均幅值(N)；

A——试件径向横截面面积，可取试件上下端面面积平均值(mm²)

2 应变幅值应按式(D.0.5-2)计算确定：

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta_i}{l_0} \quad (\text{D.0.5-2})$$

式中： ε_0 ——可恢复轴向应变幅值(mm/mm)；

Δ_i ——最后 5 次加载循环中可恢复轴向变形平均幅值(mm)；

l_0 ——位移传感器的量测间距(mm)。

3 动态回弹模量应按式(D.0.5-3)计算：

$$M_R = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (\text{D.0.5-3})$$

式中： M_R ——路基土或粒料动态回弹模量(MPa)。

根据《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)研究成果，不同交通荷载等级的路基内当量应力水平变化幅度较小。确定路基当量回弹模量时，当量应力水平可按围压为14.1kPa和最大轴向应力为27.6kPa取用。

附录 E 路基回弹模量取值表

表 E-1 标准状态下路基土回弹模量参考值

土 组	取值范围 (MPa)
砾 (G)	110~135
含细粒土砾 (GF)	100~130
粉土质砾(GM)	100~125
黏土质砾(GC)	95~120
砂 (S)	95~125
含细粒土砂 (SF)	80~115
粉土质砂(SM)	65~95
黏土质砂(SC)	60~90
低液限粉土(ML)	50~90
低液限黏土(CL)	50~85
高液限粉土(MH)	30~70
高液限黏土(CH)	20~50

- 注：1.对砾和砂， D_{60} (通过率为 60%的颗粒粒径)大时，模量取高值， D_{60} 小时，模量取低值。
 2.对其他含细粒的土组，小于 0.075mm 颗粒含量大和塑性指数高时，模量取低值，反之，模量取高值。
 3.同等条件下，轻、中等及重交通荷载时路基土回弹模量取小值，特重、极重交通条件下取较大值。

表 E-2 标准状态下粒料回弹模量参考值

粒料类型	取值范围 (MPa)
级配碎石	180~400
未筛分碎石	180~220
级配砾石	150~300
天然砂砾	100~140

附录 F 刚度过渡层设计表及诺模图

表 F.1 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 80MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa/m)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	27.01	37.63	47.40	56.43	64.82	72.66	79.97
0.2	35.49	46.15	55.08	62.74	69.44	75.37	80.60
0.3	42.84	53.01	60.92	67.36	72.71	77.22	81.10
0.4	48.42	57.85	64.82	70.24	74.60	78.22	81.23
0.5	52.66	61.32	67.49	72.10	75.81	78.75	81.23
0.6	55.94	63.90	69.39	73.44	76.59	79.06	81.17
0.7	58.61	65.90	70.82	74.44	77.17	79.30	81.10
0.8	60.82	67.53	72.00	75.20	77.63	79.54	81.04
0.9	62.70	68.88	72.97	75.81	77.98	79.67	81.04
1.0	64.30	70.05	73.75	76.37	78.34	79.85	81.04

表 F.2 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 100MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa/m)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	28.08	39.21	49.56	59.25	68.34	76.94	85.04
0.2	38.24	50.01	60.07	68.84	76.65	83.60	89.85
0.3	47.31	59.04	68.43	76.14	82.73	88.31	93.25
0.4	54.47	65.73	74.28	81.04	86.61	91.20	95.14
0.5	60.04	70.67	78.40	84.35	89.07	93.00	96.30
0.6	64.50	74.44	81.55	86.76	90.88	94.28	97.02
0.7	68.16	77.40	83.80	88.54	92.26	95.14	97.57
0.8	71.21	79.85	85.75	90.00	93.25	95.94	98.03
0.9	73.86	81.94	87.34	91.04	94.19	96.48	98.41
1.0	76.14	83.66	88.62	92.17	94.88	97.02	98.69

表 F.3 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 120MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	28.98	40.50	51.28	61.47	71.06	80.22	88.92
0.2	40.55	53.26	64.22	73.91	82.59	90.48	97.66
0.3	51.15	64.26	74.87	83.80	91.44	98.03	103.84
0.4	59.76	72.66	82.59	90.56	97.20	102.91	107.74
0.5	66.62	79.00	88.16	95.41	101.20	106.08	110.16
0.6	72.15	83.94	92.42	98.88	104.05	108.31	111.82
0.7	76.76	87.94	95.76	101.60	106.30	110.04	113.05
0.8	80.72	91.20	98.41	103.84	107.97	111.34	114.05
0.9	84.14	94.02	100.71	105.65	109.46	112.43	114.93
1.0	87.12	96.48	102.71	107.18	110.63	113.42	115.58

表 F.4 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 140MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	29.78	41.61	52.74	63.27	73.33	82.93	92.09
0.2	42.59	56.06	67.84	78.28	87.79	96.39	104.26
0.3	54.55	68.84	80.53	90.48	99.07	106.63	113.30
0.4	64.46	78.81	90.08	99.26	106.85	113.42	119.18
0.5	72.51	86.54	97.11	105.43	112.31	118.09	123.01
0.6	79.12	92.67	102.51	110.16	116.36	121.42	125.70
0.7	84.69	97.57	106.85	113.79	119.45	123.89	127.72
0.8	89.46	101.80	110.39	116.88	121.85	126.01	129.32
0.9	93.68	105.33	113.42	119.31	123.89	127.72	130.79
1.0	97.39	108.42	115.97	121.42	125.70	129.16	131.79

表 F.5 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 160MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00

0.1	30.49	42.59	54.01	64.86	75.26	85.18	94.79
0.2	44.42	58.57	71.01	82.13	92.34	101.60	110.16
0.3	57.63	72.97	85.68	96.57	105.98	114.42	121.85
0.4	68.75	84.49	96.84	107.07	115.71	123.15	129.64
0.5	77.92	93.51	105.33	114.81	122.71	129.32	134.89
0.6	85.53	100.71	111.95	120.71	127.88	133.67	138.69
0.7	92.01	106.63	117.15	125.40	131.79	137.22	141.74
0.8	97.66	111.70	121.56	129.16	135.07	140.01	143.91
0.9	102.61	116.10	125.40	132.30	137.77	142.32	145.94
1.0	107.07	119.87	128.51	135.07	140.20	144.11	147.61

表 F.6 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 180MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	31.14	43.47	55.14	66.28	76.94	87.19	97.11
0.2	46.09	60.85	73.86	85.61	96.39	106.19	115.45
0.3	60.50	76.71	90.32	102.00	112.31	121.42	129.64
0.4	72.71	89.61	103.12	114.30	123.89	132.13	139.44
0.5	82.93	99.93	112.92	123.45	132.30	139.82	146.15
0.6	91.52	108.19	120.71	130.63	138.69	145.32	151.06
0.7	98.88	115.19	126.78	136.13	143.51	149.75	154.91
0.8	105.33	120.99	132.30	140.77	147.61	153.30	157.99
0.9	111.10	126.16	136.86	144.71	151.06	156.32	160.44
1.0	116.23	130.63	140.77	148.24	153.99	158.72	162.72

表 F.7 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 200MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	31.74	44.27	56.16	67.49	78.40	88.92	99.07
0.2	47.62	62.93	76.48	88.77	100.02	110.39	120.15
0.3	63.00	80.22	94.62	107.07	118.09	128.04	136.86
0.4	76.37	94.45	108.99	121.13	131.46	140.58	148.46

0.5	87.64	105.87	120.15	131.63	141.35	149.53	156.79
0.6	97.11	115.32	129.00	139.82	148.88	156.32	162.97
0.7	105.33	123.15	136.13	146.56	154.91	161.70	167.74
0.8	112.56	129.97	141.74	151.95	159.70	166.12	171.35
0.9	119.04	135.78	147.61	156.79	163.75	169.66	174.54
1.0	124.94	140.96	152.40	160.69	167.46	172.79	177.23

表 F.8 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 220MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	32.31	45.02	57.09	68.65	79.79	90.56	100.90
0.2	49.04	64.82	78.87	91.60	103.43	114.30	124.49
0.3	65.44	83.39	98.59	111.82	123.45	134.02	143.51
0.4	79.79	98.88	114.42	127.41	138.51	148.46	157.03
0.5	92.01	111.58	126.78	139.25	149.96	158.96	166.92
0.6	102.40	121.99	136.86	148.67	158.47	166.92	173.95
0.7	111.46	130.79	145.12	156.32	165.59	173.37	179.70
0.8	119.45	138.32	152.17	162.72	171.35	178.46	184.51
0.9	126.78	145.12	158.23	168.28	176.02	182.88	188.21
1.0	133.32	151.06	163.49	172.79	180.32	186.51	191.70

表 F.9 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 240MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	32.84	45.72	57.95	69.67	81.04	91.93	102.61
0.2	50.38	66.62	81.10	94.28	106.52	117.82	128.51
0.3	67.71	86.46	102.30	116.23	128.51	139.63	149.75
0.4	83.06	103.12	119.45	133.32	145.32	155.85	165.06
0.5	96.12	116.88	133.15	146.56	157.99	167.74	176.32
0.6	107.41	128.35	144.31	157.27	167.74	176.93	184.84
0.7	117.28	137.95	153.53	165.85	175.72	184.18	191.34

0.8	126.16	146.56	161.45	173.07	182.55	190.29	196.81
0.9	134.02	153.99	168.28	179.07	188.21	195.32	201.41
1.0	141.35	160.69	174.24	184.51	192.77	199.47	205.42

表 F.10 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 260MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa/m)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	33.35	46.40	58.77	70.67	82.13	93.25	104.05
0.2	51.66	68.34	83.19	96.84	109.46	121.13	132.13
0.3	69.86	89.30	105.76	120.29	133.15	144.92	155.61
0.4	86.10	107.18	124.34	138.88	151.73	162.72	172.79
0.5	100.12	121.99	139.25	153.53	165.59	176.32	185.50
0.6	112.19	134.36	151.50	165.32	176.63	186.51	194.95
0.7	122.86	144.92	161.70	175.51	185.84	194.95	202.60
0.8	132.47	154.22	170.22	182.88	193.13	201.81	209.16
0.9	141.16	162.46	177.84	189.94	199.47	207.48	214.37
1.0	149.10	169.94	184.51	196.06	205.01	212.60	218.91

表 F.11 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 280MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa/m)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	33.83	47.01	59.55	71.60	83.19	94.53	105.43
0.2	52.85	69.91	85.18	99.16	112.19	124.19	135.60
0.3	71.90	92.01	109.11	124.19	137.77	149.96	161.19
0.4	89.00	110.98	129.00	144.31	157.75	169.39	180.01
0.5	103.84	126.78	145.12	160.19	173.07	184.18	194.22
0.6	116.75	140.20	158.23	173.07	185.17	195.69	205.01
0.7	128.20	151.73	169.39	183.53	195.32	205.01	213.48
0.8	138.51	161.70	179.07	192.41	203.40	213.04	220.78
0.9	147.82	170.79	187.18	200.24	210.87	219.38	226.59
1.0	156.55	178.76	194.59	207.07	217.07	225.11	231.67

表 F.12 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 300MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	34.29	47.62	60.28	72.46	84.21	95.67	106.74
0.2	53.98	71.46	87.05	101.40	114.68	127.09	138.88
0.3	73.80	94.53	112.19	127.88	141.93	154.68	166.39
0.4	91.76	114.55	133.32	149.31	163.49	175.72	187.18
0.5	107.41	131.46	150.62	166.39	180.01	192.06	202.60
0.6	121.13	145.73	164.79	180.32	193.49	204.61	214.37
0.7	133.32	157.99	176.93	192.06	204.61	214.81	224.13
0.8	144.31	168.83	187.18	201.81	213.48	223.65	232.19
0.9	154.45	178.76	196.44	210.44	221.73	231.15	238.63
1.0	163.75	187.52	204.61	217.99	228.60	236.99	244.85

表 F.13 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 320MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	34.73	48.19	60.96	73.28	85.18	96.75	107.97
0.2	55.08	72.87	88.84	103.53	117.15	129.97	141.93
0.3	75.64	96.93	115.19	131.46	145.94	159.21	171.35
0.4	94.45	117.95	137.58	154.22	168.83	181.91	193.86
0.5	110.86	135.78	155.85	172.50	186.85	199.47	210.44
0.6	125.40	151.06	171.07	187.52	201.41	213.48	223.65
0.7	138.32	164.27	184.18	199.86	213.48	224.62	234.30
0.8	149.96	175.72	195.32	210.87	223.17	234.30	243.12
0.9	160.69	186.17	205.42	219.84	232.19	241.98	250.79
1.0	170.50	195.69	213.92	228.09	239.73	248.98	257.03

表 F.14 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 340MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00

0.1	35.16	48.74	61.65	74.07	86.10	97.75	109.22
0.2	56.12	74.28	90.56	105.54	119.45	132.64	144.92
0.3	77.46	99.35	118.09	134.71	149.75	163.49	176.02
0.4	96.93	121.27	141.54	158.96	174.24	187.86	200.24
0.5	114.17	140.20	160.94	178.46	193.49	206.65	218.45
0.6	129.32	156.08	177.23	194.59	209.16	221.73	232.72
0.7	142.91	170.22	190.99	207.90	221.73	233.77	244.27
0.8	155.38	182.55	203.00	219.38	232.72	244.27	253.87
0.9	166.65	193.86	213.92	229.61	242.55	253.25	262.25
1.0	177.54	204.20	223.17	238.63	250.79	260.92	269.08

表 F.15 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 360MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	35.57	49.27	62.28	74.82	86.97	98.78	110.27
0.2	57.12	75.59	92.17	107.41	121.70	135.07	147.82
0.3	79.12	101.60	120.85	137.95	153.53	167.46	180.64
0.4	99.45	124.49	145.32	163.49	179.38	193.49	206.24
0.5	117.42	144.31	165.85	184.18	199.86	213.48	226.10
0.6	133.32	161.19	183.20	201.02	216.62	229.61	241.42
0.7	147.61	176.02	197.94	215.26	230.12	243.12	253.87
0.8	160.69	189.24	210.87	228.09	241.98	253.87	264.26
0.9	172.79	201.02	222.21	238.63	252.63	263.59	273.35
1.0	183.85	212.17	232.19	248.38	261.58	271.91	281.54

表 F.16 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 380MPa

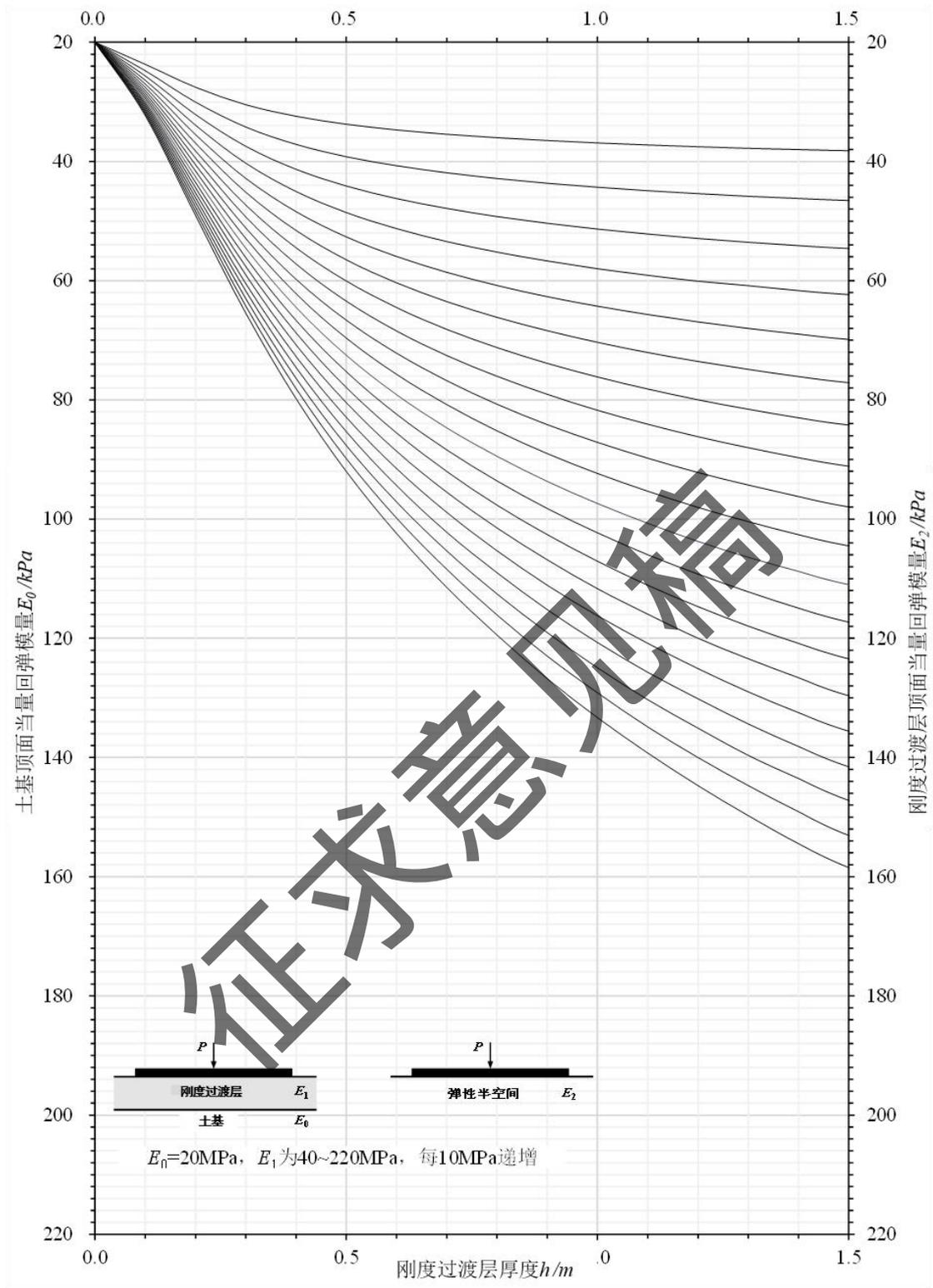
$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	35.96	49.77	62.89	75.53	87.79	99.64	111.34
0.2	58.08	76.88	93.76	109.34	123.74	137.40	150.40
0.3	80.79	103.74	123.45	141.16	157.03	171.64	185.17
0.4	101.80	127.56	149.10	167.74	184.18	198.70	212.17

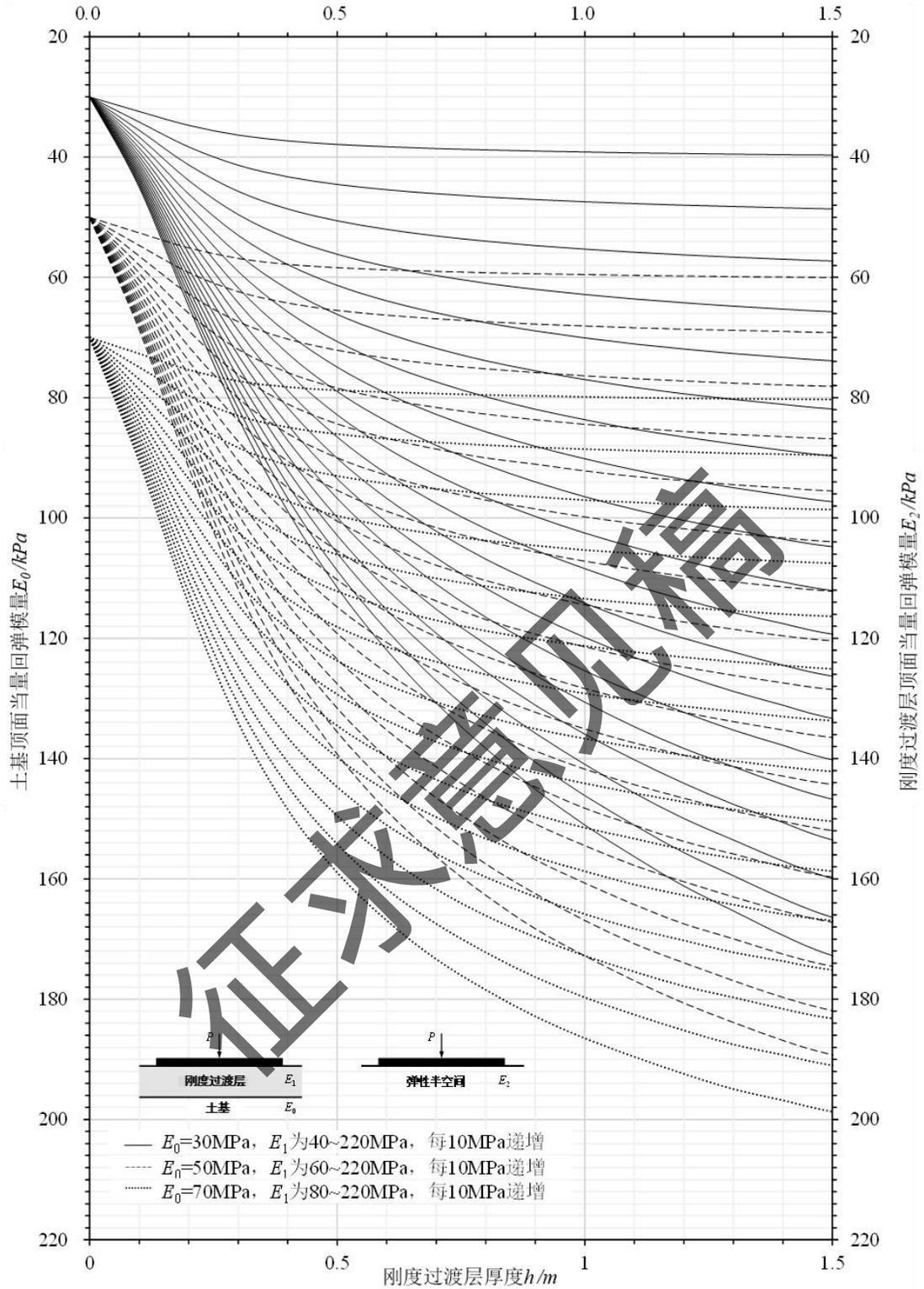
0.5	120.43	148.24	170.50	189.59	205.83	220.31	233.24
0.6	137.04	165.85	188.90	207.48	223.65	237.53	249.58
0.7	151.95	181.59	204.20	222.68	238.63	252.01	263.59
0.8	165.85	195.32	217.99	235.90	250.79	263.59	274.80
0.9	178.46	208.32	230.12	247.78	262.25	274.07	284.64
1.0	190.29	219.84	241.42	258.31	271.91	283.08	292.71

表 F.17 刚度过渡层结构回弹模量 (MPa)

-刚度过渡层的回弹模量为 400MPa

$\frac{E_0}{h \text{ (m)}} \text{ (MPa)}$	20	30	40	50	60	70	80
0	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
0.1	36.34	50.26	63.47	76.20	88.54	100.61	112.31
0.2	59.01	78.10	95.23	111.10	125.85	139.82	152.85
0.3	82.40	105.76	126.01	144.11	160.44	175.43	189.24
0.4	104.05	130.63	152.85	171.92	188.90	204.20	217.99
0.5	123.45	151.95	175.13	194.95	211.73	226.59	240.29
0.6	140.77	170.50	194.22	213.92	230.64	244.85	257.67
0.7	156.32	186.85	210.87	230.12	246.60	260.27	272.63
0.8	170.79	201.81	225.11	244.27	259.61	273.35	284.64
0.9	184.18	214.81	238.08	256.39	271.91	284.64	295.22
1.0	196.44	227.09	250.18	267.68	282.31	294.38	304.80





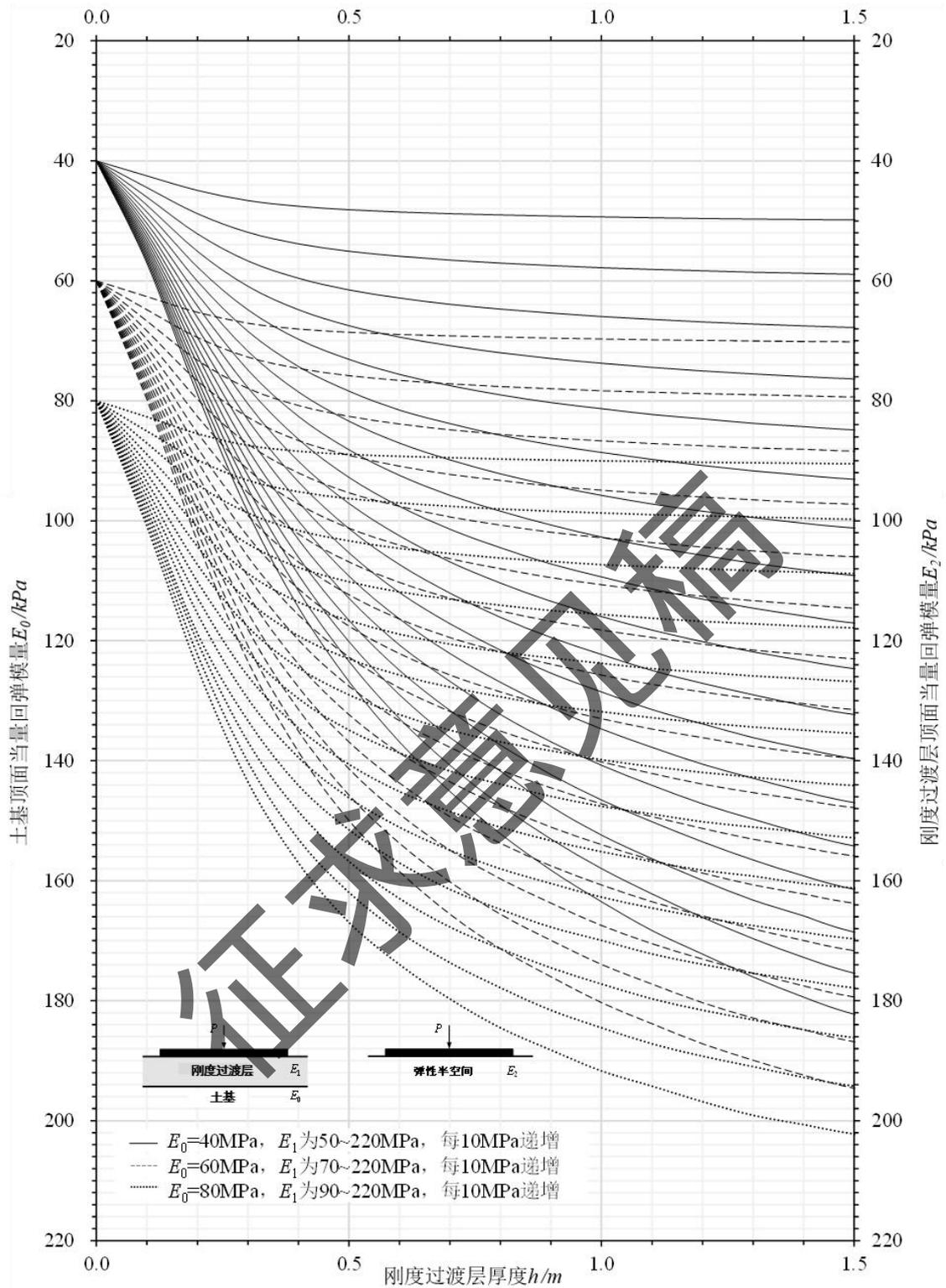


图 F.1 刚度过渡层设计诺模图

附录 G 粒料类材料回弹模量试验方法

本附录规定了粒料类材料回弹模量试验方法，粒料层的回弹模量在结构验算时应采用粒料材料的回弹模量乘以湿度调整系数后得到，湿度调整系数可在 1.6~2.0 范围内取值。

G.1 适用范围

G.1.1 本方法适用于采用动态三轴压缩试验测试粒料类材料的回弹模量。

G.1.2 成型试件可采用冲击压实、静载压实和振动压实等方法。

G.2 仪器设备

G.2.1 动三轴试验仪根据传感器位置可分为外置式和内置式。

G.2.2 三轴压力室应采用聚碳酸酯、丙烯酸或其它透明材料制成，侧压宜采用气压。

G.2.3 加载应为顶部加载式，宜采用闭路电液或电气压装置，应能够产生图 G.1 所示的重复循环半正矢脉冲荷载，荷载波形应能实时显示。

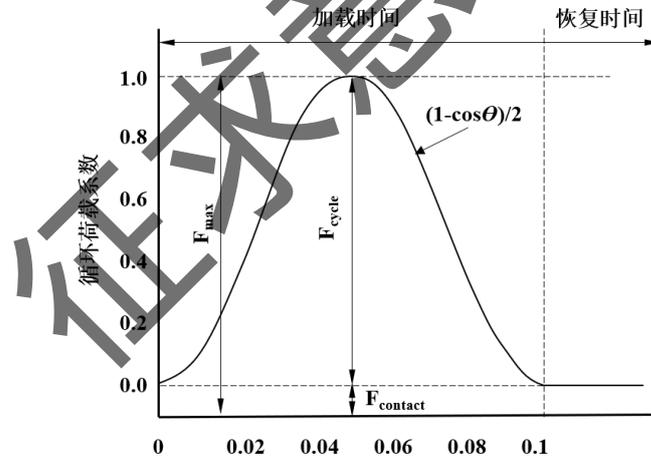


图 G.1 半正矢形加载波

G.2.4 轴向荷载测量应采用电子荷载传感器。加载能力和精度应满足表 G.1 的要求。

表 G.1 荷载传感器加载能力和精度要求

试件直径 (mm)	加载能力 (kN)	精度要求 (N)
100	≥ 9.0	± 18.0
150	≥ 22.0	± 22.0

G.2.5 轴向变形测量可采用光学变形测量仪、非接触式逼近传感器和线性可变差动传感器。各类传感器应满足下列要求：

1 光学变形测量仪应采用模拟数字输出信号，分辨率应不低于 0.005mm,频率响应应不小于 200Hz，线性度应不大于±%，位移量程应不小于 12.7mm,可测量长度范围为 63.5~127.0mm。

2 非接触式逼近传感器和线性可变差动传感器应满足表 G.2 的要求。

表 G.2 非接触式逼近传感器和线性可变差动传感器技术要求

试件直径 (mm)	最小量程 (mm)	试件回弹位移* (mm)	最小 AC 输出 (mV)	线性可变差动传感器最小灵敏度 (mV/V)	非接触式逼近传感器最小灵敏度 (mV/V)
150	±6.0	0.025	6	2.1	—
100	±2.5	0.015	5	2.8	5

注*：指在 2 倍直径高度试件中部 1/2 部位所测得的最小回弹位移。当采用其它测量长度时，应对其进行修正。

G.2.6 数据采集系统应能自动处理数据，配备信号激励、调节和采集装置，测量精度不低于±0.02%，非线性度不大于±0.5%。

G.2.7 三轴室应采用承压能力不小于 210kPa、精度不低于 1.0kPa 的压力调整器控制，压力应采用常规压力表、压力计或压力传感器监测，精确至 1.0kPa。

G.2.8 其它工具应包括测径器、千分尺、标定至 0.5mm 的钢尺、0.25~0.79mm 厚的橡皮膜、橡皮 O 形环、带气室和调整器的真空源、张膜器、6.4mm 厚多孔透水石或多孔透水青铜垫盘、天平、湿量罐、数据记录表和报告表。

G.3 试件准备

G.3.1 最大粒径大于 19mm 粒料类材料的试件尺寸为：直径×高度=φ150mm×300mm,制备试件时应筛除粒径大于 26.5mm 的颗粒。最大粒径小于 19mm 粒料类材料的试件尺寸为：直径×高度=φ100mm×200mm。

G.3.2 室内压实试件目标含水率应采用击实试验的最佳含水率，室内压实试件含水率与目标含水率偏差不应超过±0.5%。

G.3.3 室内压实试件应采用与现场压实度要求相应的干密度，缺少现场压实

度时可采用击实试验最大干密度的 95%，室内压实密度与目标压实度偏差不应超过 $\pm 1.0\%$ 。

G.4 试验步骤

G.4.1 每组试验前，应对测试系统进行校准。

G.4.2 应按下列步骤和要求组装试件：

1 在试件下依次放置底部压盘和预先浸湿的多孔透水石。当透水石存在堵塞问题时，应在试件与透水石间放置预先浸湿的滤纸。

2 将试件置于透水石上，将橡皮膜置于张膜器上。对张膜器施加真空作用，在试件上套装橡皮膜，并依次加放预先浸湿的透水石和顶部压盘，然后取消真空作用并移去张膜器。

3 将橡皮膜折叠合拢，用橡皮 O 形环或其它压力密封措施将橡皮膜两端封于底部与顶部压盘。橡皮膜与试件和两端压盘间应保持紧密接触，不透气，可在端部压盘四周敷设真空油。

G.4.3 将组装好的试件置于三轴室基座上。通过气室媒体将试件底部的排水管与真空源连接，然后施加 35kPa 的真空荷载。当存在气泡时，应检查并消除引起泄漏的原因。对因橡皮膜有漏洞引起的泄漏，可采用在橡皮膜表面涂抹液态乳胶或套装第二个橡皮膜等方法来消除。泄漏现象被排除后，断开真空源，并仔细清洁用于密封的 O 形环和其所有接触面。

G.4.4 应按下列步骤和要求组装设备：

1 盖上三轴室顶板，插入加载活塞，使之与荷载传感器紧密连接，同时连接活塞杆和加载装置。用扳手均匀拧紧系杆，并在底座上栓牢三轴室。检查三轴室顶板，确保其在一水平面内，可用校核好的水平仪检查。

2 对固定不动的三轴室，将试件置于轴向重复加载装置下，用光滑的钢球连接加载装置和试件，当活塞与钢球接触紧密并有少量荷载作用于试件时，慢慢旋转钢球，对中试件，确保钢球与活塞同轴，并侧向移动试件以获得同轴荷载。

3 对可移动的三轴室，将其移至轴向重复加载装置下并准确定位，确保能对试件施加准确的轴心荷载。

4 安装轴向位移测量系统，并进行检验。

G.4.5 打开所有连接试件的排水管阀门，连通围压供给管和三轴室，对试件施加 105.0kPa 的预载围压。对试件至少施加 1000 次、最大轴向应力为 231.0kPa 的半正矢脉冲荷载，加载时长为 0.1s，恢复时长为 0.9s。当试件垂直永久变形达到试件高度的 5%时，应停止预载，分析试件变形过大原因，必要时重新制备试件测试。当预载期间试件垂直永久变形再次达到 5%时，应停止试验，并记录说明。

G.4.6 按表 G.3 的加载序列 1,将最大轴向应力调整为 14.0kPa,围压调整为 20.0kPa。在相应的轴向循环应力水平下，对试件施加 100 次半正矢脉冲荷载，加载时间为 0.1s,恢复时间为 0.9s,记录最后 5 次循环的回弹变形平均值。完成加载序列 1 之后，按加载序列 2 至加载序列 25 依次改变应力水平进行以上测试，并记录每个加载序列最后 5 次循环的回弹变形平均值。试验过程中，当试件垂直永久变形达到试件高度的 5%时，应停止试验并记录结果。

表 G.3 加载序列

加载序列号	围压应力 σ_3 (kPa)	接触应力 $0.2\sigma_3$ (kPa)	循环偏应力 σ_a (kPa)	最大轴向应力 σ_{max} (kPa)	荷载作用次数
0-预载	105	21	210	231	1000
1	20	4	10	14	100
2	40	8	20	28	100
3	70	14	35	49	100
4	105	21	50	71	100
5	140	28	70	98	100
6	20	4	20	24	100
7	40	8	40	48	100
8	70	14	70	84	100
9	105	21	105	126	100
10	140	28	140	168	100
11	20	4	40	44	100
12	40	8	80	88	100
13	70	14	140	154	100
14	105	21	210	231	100
15	140	28	280	308	100
16	20	4	60	64	100
17	40	8	120	128	100

18	70	14	210	224	100
19	105	21	315	336	100
20	140	28	420	448	100
21	20	4	80	84	100
22	40	8	160	168	100
23	70	14	280	294	100
24	105	21	420	441	100
25	140	28	560	588	100

G.4.7 测试完成后，将围压降为 0，移出试件，去掉橡皮膜，测试试件含水率并记录。

G.5 回弹模量计算

G.5.1 应按每个加载序列最后 5 次循环的回弹变形计算回弹模量，计算全部序列的均值。

G.5.2 应根据测试所得的相关数据和式 (G.5.2-1) 所示的回弹模量本构模型，采用非线性拟合技术，确定模型参数 k_1 、 k_2 和 k_3 。

$$M_R = K_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{K_3} \quad (G.5.2-1)$$

式中： M_R ——回弹模量 (MPa)；

θ ——体应力 (MPa)；

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (G.5.2-2)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力 (MPa)；

τ_{oct} ——八面体剪应力 (MPa)；

$$\tau_{oct} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} / 3 \quad (G.5.2-3)$$

k_i ——回归常数， k_1 、 $k_2 \geq 0, k_3 \leq 0$ ；

P_a ——参考气压 (MPa)。

G.6 试验报告

G.6.1 试验报告中应记录的试件信息数据包括：试件个数、尺寸、压实度和含水率，以及加载过程中永久变形量是否达到 5%。

G.6.2 试验报告中应记录的试验数据包括：每加载序列的围压，名义最大轴

向应力，最后 5 次循环的轴向荷载、轴向应力、轴向回弹变形和回弹模量及回弹模量标准差，本构模型回归参数 k_1 、 k_2 和 k_3 ，标准估计误差与标准差之比，相关系数的平方。

征求意见稿

附录 H 路面结构验算方法

H.1 路面结构验算软件

H.1.1 麦道(Mroad)软件是与本标准配套使用的路面结构验算软件，推荐使用该软件进行寿命逐层递增式耐久性公路沥青路面设计与结构验算。

H.1.2 麦道(Mroad)软件采用云计算结构，可通过网络浏览器直接访问并使用。软件的访问地址为：<https://mroad.mailsoft.com>。

H.1.3 使用麦道(Mroad)软件需要必要的身份认证，按网络地址启动后，用户可根据提示信息进行认证，认证通过后，即可进入软件开展路面结构计算操作。

H.2 路面结构验算算例

算例一

H.2.1 交通参数

该项目位于湖南省，属于高速公路，设计年限按照本标准 3.0.4 实施，根据交通量 OD 调查分析，断面大型客车和货车交通量为 5398 辆/日，交通量年增长率为 5.7%，方向系数取 0.6，车道系数取 0.5。根据交通历史数据，按 JTG D50-2017 表 A.2.6-1 确定该设计公路为 TTC3 类，根据 JTG D50-2017 表 A.2.6-2 得到车辆类型分布系数如表 H.2.1-1 所示。

表 H.2.1-1 车辆类型分布系数

车辆类型	2类	3类	4类	5类	6类	7类	8类	9类	10类	11类
车型分布系数(%)	17.8	33.1	3.4	0.0	12.5	4.4	9.1	10.6	8.5	0.7

根据路网相邻公路的车辆满载情况及历史数据的调查分析，得到各类车型非满载与满载比例，如表 H.2.1-2 所示。

表 H.2.1-2 非满载车与满载车所占比例(%)

车辆类型	2类	3类	4类	5类	6类	7类	8类	9类	10类	11类
非满载车比例	85.0	90.0	65.0	75.0	55.0	70.0	45.0	60.0	55.0	65.0
满载车比例	15.0	10.0	35.0	25.0	45.0	30.0	55.0	40.0	45.0	35.0

根据本标准与 JTG D50-2017 表 6.2.1 之要求，该设计路面对应的设计指标为沥青混合料层有效应力、沥青混合料层永久变形与无机结合料层疲劳开裂。根据 JTG D50-2017 附表 A.3.1-3，可得到在不同设计指标下，各车型对应的非满载车和满载车当量设计轴载换算系数，如表 H.2.1-3 所示。

表 H.2.1-3 非满载车与满载车当量设计轴载换算系数

设计指标	沥青混合料层永久变形 沥青混合料层有效应力		无机结合料层有效应力	
	非满载车	满载车	非满载车	满载车
2类	0.8	2.8	0.5	35.5
3类	0.4	4.1	1.3	314.2
4类	0.7	4.2	0.3	137.6
5类	0.6	6.3	0.6	72.9
6类	1.3	7.9	10.2	1505.7
7类	1.4	6.0	7.8	553.0
8类	1.4	6.7	16.4	713.5
9类	1.5	5.1	0.7	204.3
10类	2.4	7.0	37.8	426.8
11类	1.5	12.1	2.5	985.4

根据 JTG D50-2017 公式 (A.4.2) 计算得到对应于沥青混合料层永久变形和疲劳开裂的 15 年当量设计轴载累计作用次数为 30,834,435, 对应于无机结合料层疲劳开裂的当量设计轴载累计作用次数为 2,312,984,675。本公路设计使用年限为 15 年内设计车道累计大型客车和货车交通量为 13,447,701, 交通等级属于重交通。

H.2.2 环境参数

沥青混合料层疲劳开裂寿命、无机结合料稳定层疲劳开裂寿命和路基顶面竖向压应变验算时, 根据所在地的气温条件、路面结构类型和结构层厚度, 按 JTG D50-2017 附录 G 确定温度调整系数。沥青混合料层永久变形量验算时, 根据所在地的气温条件, 按 JTG D50-2017 附录 G 选用相应的等效温度, 见表 H.2.2-1。

表 H.2.2-1 基准路面结构温度调整系数和等效温度

地名	省(自治区、直辖市)	最热月平均气温(°C)	最冷月平均气温(°C)	年平均气温(°C)	温度调整系数		基准等效温度
					沥青混合料层有效应力、无机结合料稳定层有效应力	路基顶面竖向压应变	
常宁	湖南	29.1	6.0	18.1	1.45	1.31	23.9

H.2.3 路面结构组合及材料参数

路面结构验算时结构层模量取值按本标准第 5 章确定。拉、压模量取值：沥青面层采用 15℃、10Hz 条件下的动态拉、压模量。无机结合料稳定层采用经结构和湿度调整系数修正后的拉、压弹性模量。

粒料层采用经过湿度调整的回弹模量，路基采用平衡湿度状态下考虑干湿冻融循环作用后的顶面当量回弹模量。

表 H.2.3-1 路面结构组合及结构层厚度

结构层位	结构层	厚度 (mm)	压模量(MPa)	拉模量(MPa)	压泊 松比	拉泊松 比
表面层	改性 AC-13/SMA-13	40	11000	5500	0.25	0.12500
中面层	改性 AC-20	60	10000	5000	0.25	0.12500
下面层	AC-25	80	9000	4000	0.25	0.11111
基层	水泥稳定碎石	360	11500	7000	0.25	0.15217
底基层	水泥稳定碎石	200	10000	6500	0.25	0.16250
刚度过渡层	级配碎石	150	400	-	0.35	
	路基		80MPa		0.4	

H.2.4 路面结构验算

路面结构验算时，对沥青混合料层有效应力和无机结合料稳定层有效应力设计指标，在其对应的结构层内用全域搜索法取最大力学响应量。

H.2.4.1 沥青混合料层有效应力（疲劳寿命）

根据拟定的路面结构厚度和设定的材料参数，采用数值计算软件或者本标准配套软件 Mroad<https://mroad.mailisoft.com/main#>进行路面结构主应力计算，计算点位如图 H.2.4.1-1 所示。

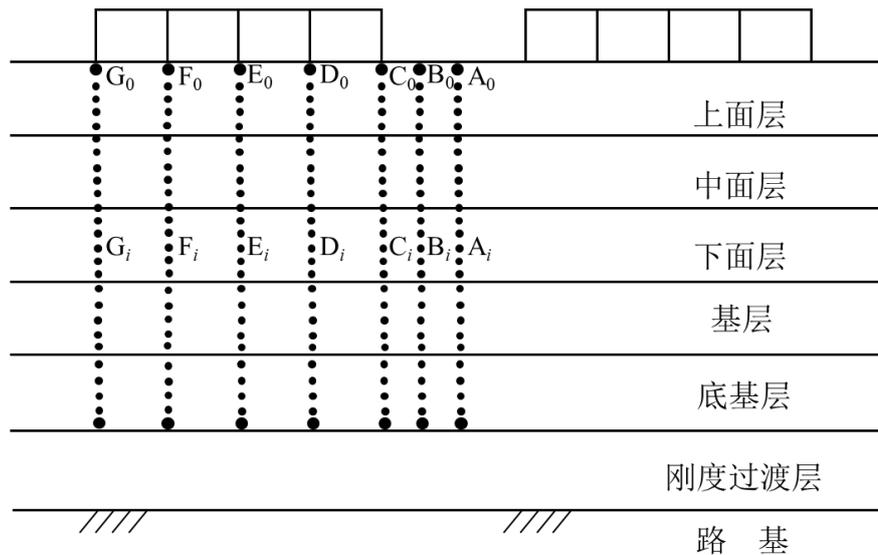


图 H.2.4.1-1 路面结构的强度校核点示意图

本算例在水平方向选取 A、B、C、D、E、F、G 七个点位，竖直方向以上面层层顶为原点，以 0.5cm 为步长，依次选取相应点位。以行车方向为 Y 方向，路面横向为 X 方向，竖直方向为 Z 方向，着重考虑这些点位的主应力，计算结果见表 H.2.4.1-1，规定主应力以受拉为正。由于数据较多，此处仅放置了 C_i 点位的计算结果。

表 H.2.4.1-1 路面结构设计点位主应力计算结果（沥青混合料层，以 C_i 点位为例）

厚度(m)	第一主应力 σ_1	第二主应力 σ_2	第三主应力 σ_3
0	-1.5726E+05	-4.4233E+05	-5.5783E+05
-0.005	-4.7077E+04	-4.3848E+05	-4.7931E+05
-0.01	-3.3965E+04	-3.9346E+05	-5.1994E+05
-0.015	-5.4010E+04	-3.6802E+05	-5.4106E+05
-0.02	-6.6958E+04	-3.3836E+05	-5.3971E+05
-0.025	-7.8908E+04	-3.0851E+05	-5.3484E+05
-0.03	-8.9369E+04	-2.8025E+05	-5.2215E+05
-0.035	-9.7733E+04	-2.5298E+05	-5.0746E+05
-0.04	-9.8508E+04	-2.1783E+05	-4.8625E+05
-0.045	-1.0340E+05	-1.9963E+05	-4.7139E+05
-0.05	-1.0803E+05	-1.8272E+05	-4.5667E+05
-0.055	-1.1206E+05	-1.6849E+05	-4.4232E+05
-0.06	-1.1592E+05	-1.5496E+05	-4.2808E+05
-0.065	-1.1950E+05	-1.4263E+05	-4.1412E+05
-0.07	-1.2263E+05	-1.3212E+05	-4.0058E+05

-0.075	-1.2160E+05	-1.2572E+05	-3.8708E+05
-0.08	-1.1259E+05	-1.2838E+05	-3.7411E+05
-0.085	-1.0410E+05	-1.3084E+05	-3.6138E+05
-0.09	-9.6007E+04	-1.3311E+05	-3.4891E+05
-0.095	-8.8647E+04	-1.3511E+05	-3.3687E+05
-0.101	-8.2822E+04	-1.2968E+05	-3.2280E+05
-0.106	-7.8717E+04	-1.2978E+05	-3.1293E+05
-0.111	-7.5039E+04	-1.2948E+05	-3.0358E+05
-0.116	-7.1456E+04	-1.2894E+05	-2.9451E+05
-0.121	-6.8705E+04	-1.2777E+05	-2.8634E+05
-0.126	-6.5953E+04	-1.2641E+05	-2.7835E+05
-0.131	-6.3202E+04	-1.2486E+05	-2.7056E+05
-0.136	-6.1310E+04	-1.2278E+05	-2.6367E+05
-0.141	-5.9501E+04	-1.2051E+05	-2.5700E+05
-0.146	-5.7693E+04	-1.1808E+05	-2.5049E+05
-0.151	-5.6184E+04	-1.1541E+05	-2.4437E+05
-0.156	-5.5187E+04	-1.1253E+05	-2.3872E+05
-0.161	-5.4191E+04	-1.0953E+05	-2.3318E+05
-0.166	-5.3303E+04	-1.0641E+05	-2.2782E+05
-0.171	-5.2921E+04	-1.0316E+05	-2.2281E+05
-0.176	-5.2539E+04	-9.9847E+04	-2.1788E+05

按照本标准附录 B 之要求，开展沥青混合料直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸强度试验，加载速度为 $v = \frac{0.7}{0.213/(80/3.6)} = 73 \text{MPa/s}$ （选定行车速度为 80km/h）。对应的换算强度结果为 $S_t=5.255\text{MPa}$ ， $S_c=25.213\text{Mpa}$ ， $S_{it}=3.821\text{MPa}$ 。注：无试验条件时，参考本标准第 5 章材料强度参数模型进行取值。进一步依据式 (H.2.4.1-1)、(H.2.4.1-2) 和 (H.2.4.1-3) 计算三维强度模型参数 $a=0.3119$ ， $b=0.4964$ ， $m=1.2372$ 。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{3\theta}{\pi} S_t(S_c - 2S_{it}) \\ k_2 = \frac{6\theta}{\pi} (S_t + S_c)S_{it} + S_t(S_c - 2S_{it}) - \sqrt{13}S_{it}(S_t + S_c) \\ k_3 = (1 - \frac{3\theta}{\pi})S_c(S_t + 2S_{it}) \end{cases} \quad (\text{H.2.4.1-1})$$

$$\begin{cases} a = \frac{\frac{S_t}{m} + S_t}{S_t + S_c} \\ b = \frac{\frac{S_c}{m} - S_t}{S_t + S_c} \end{cases} \quad (\text{H.2.4.1-2})$$

$$m = \frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4k_1k_3}}{2k_1} \quad (\text{H.2.4.1-3})$$

注： θ 为间接拉伸强度对应的罗德角，为 46°C 。

根据计算得到的三维强度模型参数，确定三维应力状态下沥青混合料层有效应力强度模型。

$$\text{拉子午线: } \sigma_{ea}^t / S_c = a - b(I_1 / S_c)$$

$$\text{压子午线: } \sigma_{ea}^c / S_c = m[a - b(I_1 / S_c)]$$

$$\text{有效应力强度包络面: } \sigma_{ea}(\theta) = \sigma_{ea}^t - (\sigma_{ea}^t - \sigma_{ea}^c)3\theta/\pi$$

由此得到各设计点位的计算有效应力 σ_{ea} 和三维强度模型确定的极限有效应力 $\sigma_{ea}(\theta)$ ，计算结果见表 H.2.4.1-2。

表 H.2.4.1-2 路面结构设计点位三维强度（沥青混合料层 C_i ）

厚度 (m)	第一应力 不变量 I_1 (Pa)	有效应力 σ_{ea} (Pa)	罗德角 θ	压子午线 σ_{ea}^c (Pa)	拉子午线 σ_{ea}^t (Pa)	极限有效应 力 $\sigma_{ea}(\theta)$ (Pa)
0	-1157420	357114.4633	0.283892948	1.044E+07	8.438E+06	8.981E+06
-0.005	-964867	413333.2576	0.085652652	1.032E+07	8.343E+06	8.505E+06
-0.01	-947365	436695.2862	0.253534293	1.031E+07	8.334E+06	8.813E+06
-0.015	-963090	427646.3634	0.358022489	1.032E+07	8.342E+06	9.019E+06
-0.02	-945028	410910.7699	0.438255296	1.031E+07	8.333E+06	9.160E+06
-0.025	-922258	394852.0837	0.51945544	1.030E+07	8.322E+06	9.301E+06
-0.03	-891769	375666.4479	0.591555723	1.028E+07	8.307E+06	9.420E+06
-0.035	-858173	358286.1398	0.662528156	1.026E+07	8.290E+06	9.534E+06
-0.04	-802588	343970.1256	0.742063435	1.022E+07	8.262E+06	9.651E+06
-0.045	-774420	330552.8328	0.792331386	1.020E+07	8.248E+06	9.729E+06

-0.05	-747420	317944.2154	0.842324646	1.019E+07	8.235E+06	9.806E+06
-0.055	-722870	305972.9411	0.886791157	1.017E+07	8.223E+06	9.874E+06
-0.06	-698960	294586.593	0.932174329	1.016E+07	8.211E+06	9.945E+06
-0.065	-676250	283762.8952	0.976547577	1.014E+07	8.200E+06	1.001E+07
-0.07	-655330	273328.5881	1.017124517	1.013E+07	8.189E+06	1.008E+07
-0.075	-634400	263444.1633	1.033653377	1.012E+07	8.179E+06	1.009E+07
-0.08	-615080	253993.3733	0.993333328	1.011E+07	8.169E+06	1.001E+07
-0.085	-596320	245006.8546	0.952538409	1.010E+07	8.160E+06	9.921E+06
-0.09	-578027	236544.0763	0.910936308	1.008E+07	8.151E+06	9.833E+06
-0.095	-560627	228561.3328	0.870225599	1.007E+07	8.142E+06	9.747E+06
-0.101	-535302	220318.4593	0.861950954	1.006E+07	8.130E+06	9.717E+06
-0.106	-521427	213315.59	0.838376008	1.005E+07	8.123E+06	9.665E+06
-0.111	-508099	206767.5279	0.817153144	1.004E+07	8.116E+06	9.618E+06
-0.116	-494906	200587.7889	0.796392788	1.003E+07	8.110E+06	9.573E+06
-0.121	-482815	194933.466	0.781682394	1.003E+07	8.104E+06	9.538E+06
-0.126	-470713	189543.2643	0.767329596	1.002E+07	8.098E+06	9.505E+06
-0.131	-458622	184428.2233	0.7534624	1.001E+07	8.092E+06	9.473E+06
-0.136	-447760	179691.5727	0.746427995	1.000E+07	8.086E+06	9.453E+06
-0.141	-437011	175153.4658	0.740772954	9.998E+06	8.081E+06	9.437E+06
-0.146	-426263	170806.4417	0.736025006	9.991E+06	8.076E+06	9.422E+06
-0.151	-415964	166661.8902	0.734363738	9.985E+06	8.070E+06	9.413E+06
-0.156	-406437	162629.1761	0.736880768	9.979E+06	8.066E+06	9.412E+06
-0.161	-396901	158727.4229	0.740478359	9.973E+06	8.061E+06	9.413E+06
-0.166	-387533	154946.6438	0.745831646	9.967E+06	8.056E+06	9.417E+06
-0.171	-378891	151166.0543	0.755250329	9.962E+06	8.052E+06	9.429E+06
-0.176	-370266	147491.4951	0.765716983	9.705E+06	7.268E+06	9.050E+06

在表 H.2.4.1-2 的基础上，确定计算点位的有效应力之比（三维强度之比），按照本标准表 5.5.4 选取沥青混合料疲劳归一化方程参数 $\gamma = 5.46$ ，得到沥青混合料疲劳归一化模型 $N_f = (\Delta)^\gamma = \left(\frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{ea}(\theta)} \right)^{-5.46}$ ，进而反算路面结构疲劳寿命，同时按照本标准表 3.0.4 的设计年限要求，计算中上面层 15 年，下面层 30 年的设计交通量，计算结果见表 H.2.4.1-3。

表 H.2.4.1-3 路面结构设计点位疲劳开裂寿命验算结果 (沥青混合料层 C_i)

厚度	有效应力之比 $\Delta = \frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{ea}(\theta)}$	疲劳开裂寿命 N_f	设计交通量
0	0.039762846	4.913E+08	3.083E+07
-0.005	0.048600248	1.643E+08	3.083E+07
-0.01	0.049552262	1.478E+08	3.083E+07
-0.015	0.047418729	1.879E+08	3.083E+07
-0.02	0.044857986	2.544E+08	3.083E+07
-0.025	0.04245314	3.437E+08	3.083E+07
-0.03	0.039881209	4.834E+08	3.083E+07
-0.035	0.037579866	6.687E+08	3.083E+07
-0.04	0.035640478	8.930E+08	3.083E+07
-0.045	0.033977106	1.159E+09	3.083E+07
-0.05	0.032422983	1.497E+09	3.083E+07
-0.055	0.030986341	1.917E+09	3.083E+07
-0.06	0.029622775	2.451E+09	3.083E+07
-0.065	0.028338433	3.122E+09	3.083E+07
-0.07	0.027126845	3.963E+09	3.083E+07
-0.075	0.026099647	4.892E+09	3.083E+07
-0.08	0.025380713	5.698E+09	3.083E+07
-0.085	0.024696955	6.614E+09	3.083E+07
-0.09	0.024056925	7.634E+09	3.083E+07
-0.095	0.023448972	8.778E+09	3.083E+07
-0.101	0.022673757	1.055E+10	6.120E+07
-0.106	0.022070284	1.222E+10	6.120E+07
-0.111	0.021497088	1.411E+10	6.120E+07
-0.116	0.020954585	1.622E+10	6.120E+07
-0.121	0.020436673	1.860E+10	6.120E+07
-0.126	0.019941389	2.126E+10	6.120E+07
-0.131	0.019469741	2.423E+10	6.120E+07
-0.136	0.019008222	2.762E+10	6.120E+07
-0.141	0.01856074	3.145E+10	6.120E+07
-0.146	0.018128746	3.577E+10	6.120E+07
-0.151	0.017705775	4.069E+10	6.120E+07
-0.156	0.017279033	4.649E+10	6.120E+07

-0.161	0.016862607	5.311E+10	6.120E+07
-0.166	0.016453368	6.073E+10	6.120E+07
-0.171	0.016031211	6.999E+10	6.120E+07
-0.176	0.016297312	6.397E+10	6.120E+07

从上述计算结果来看，沥青混合料层疲劳寿命均满足设计年限要求。

H.2.4.2 无机结合料层有效应力（疲劳寿命）

按照沥青层的计算方法，得到设计点位的主应力大小，见表 H.2.4.2-1，同理，以最不利位置 E_i 为例。

表 H.2.4.2-1 路面结构设计点位主应力计算结果（水泥稳定碎石层，以 E_i 点位为例）

厚度(m)	第一主应力 σ_1	第二主应力 σ_2	第三主应力 σ_3
-0.181	-4.6721E+04	-6.5619E+04	-2.6389E+05
-0.186	-4.3859E+04	-6.2586E+04	-2.5538E+05
-0.191	-4.0997E+04	-5.9538E+04	-2.4688E+05
-0.196	-3.8135E+04	-5.6472E+04	-2.3841E+05
-0.201	-3.5654E+04	-5.3713E+04	-2.3128E+05
-0.206	-3.3393E+04	-5.1130E+04	-2.2493E+05
-0.211	-3.1133E+04	-4.8538E+04	-2.1859E+05
-0.216	-2.8872E+04	-4.5935E+04	-2.1226E+05
-0.221	-2.6612E+04	-4.3321E+04	-2.0594E+05
-0.226	-2.4351E+04	-4.0695E+04	-1.9964E+05
-0.231	-2.2091E+04	-3.8056E+04	-1.9335E+05
-0.236	-1.9830E+04	-3.5404E+04	-1.8707E+05
-0.241	-1.7570E+04	-3.2736E+04	-1.8080E+05
-0.246	-1.5309E+04	-3.0053E+04	-1.7456E+05
-0.251	-1.3568E+04	-2.7828E+04	-1.6978E+05
-0.256	-1.2055E+04	-2.5809E+04	-1.6565E+05
-0.261	-1.0543E+04	-2.3787E+04	-1.6152E+05
-0.266	-9.0307E+03	-2.1764E+04	-1.5740E+05
-0.271	-7.5183E+03	-1.9739E+04	-1.5328E+05
-0.276	-6.0060E+03	-1.7711E+04	-1.4916E+05
-0.281	-4.4937E+03	-1.5681E+04	-1.4504E+05
-0.286	-2.9814E+03	-1.3648E+04	-1.4092E+05

-0.291	-1.4691E+03	-1.1613E+04	-1.3681E+05
-0.296	4.3251E+01	-9.5744E+03	-1.3270E+05
-0.302	1.5556E+03	-7.5332E+03	-1.2859E+05
-0.307	3.0679E+03	-5.4887E+03	-1.2449E+05
-0.312	4.5802E+03	-3.4410E+03	-1.2039E+05
-0.317	6.0925E+03	-1.3898E+03	-1.1629E+05
-0.322	7.4188E+03	3.4958E+02	-1.1270E+05
-0.327	8.3685E+03	1.4518E+03	-1.1012E+05
-0.332	9.3182E+03	2.5541E+03	-1.0755E+05
-0.337	1.0268E+04	3.6564E+03	-1.0497E+05
-0.342	1.1218E+04	4.7587E+03	-1.0239E+05
-0.347	1.2167E+04	5.8610E+03	-9.9817E+04
-0.352	1.3117E+04	6.9634E+03	-9.7241E+04
-0.357	1.4067E+04	8.0658E+03	-9.4665E+04
-0.362	1.5017E+04	9.1682E+03	-9.2088E+04
-0.367	1.5966E+04	1.0271E+04	-8.9512E+04
-0.372	1.6916E+04	1.1373E+04	-8.6936E+04
-0.377	1.7866E+04	1.2475E+04	-8.4360E+04
-0.382	1.8815E+04	1.3578E+04	-8.1784E+04
-0.387	1.9765E+04	1.4680E+04	-7.9208E+04
-0.392	2.0715E+04	1.5783E+04	-7.6632E+04
-0.397	2.1665E+04	1.6886E+04	-7.4056E+04
-0.402	2.2618E+04	1.7946E+04	-7.1789E+04
-0.407	2.3579E+04	1.8942E+04	-7.0007E+04
-0.412	2.4540E+04	1.9938E+04	-6.8227E+04
-0.417	2.5500E+04	2.0935E+04	-6.6447E+04
-0.422	2.6461E+04	2.1933E+04	-6.4667E+04
-0.427	2.7422E+04	2.2931E+04	-6.2888E+04
-0.432	2.8382E+04	2.3930E+04	-6.1110E+04
-0.437	2.9343E+04	2.4929E+04	-5.9332E+04
-0.442	3.0304E+04	2.5930E+04	-5.7555E+04
-0.447	3.1264E+04	2.6930E+04	-5.5779E+04
-0.452	3.2225E+04	2.7932E+04	-5.4004E+04
-0.457	3.3185E+04	2.8934E+04	-5.2229E+04

-0.462	3.4146E+04	2.9938E+04	-5.0455E+04
-0.467	3.5107E+04	3.0941E+04	-4.8682E+04
-0.472	3.6069E+04	3.1945E+04	-4.6919E+04
-0.477	3.7081E+04	3.2922E+04	-4.5528E+04
-0.482	3.8093E+04	3.3899E+04	-4.4139E+04
-0.487	3.9105E+04	3.4879E+04	-4.2751E+04
-0.492	4.0117E+04	3.5860E+04	-4.1365E+04
-0.497	4.1129E+04	3.6843E+04	-3.9980E+04
-0.503	4.2141E+04	3.7828E+04	-3.8598E+04
-0.508	4.3153E+04	3.8815E+04	-3.7217E+04
-0.513	4.4165E+04	3.9803E+04	-3.5838E+04
-0.518	4.5177E+04	4.0793E+04	-3.4461E+04
-0.523	4.6193E+04	4.1787E+04	-3.3107E+04
-0.528	4.7249E+04	4.2796E+04	-3.1983E+04
-0.533	4.8304E+04	4.3808E+04	-3.0861E+04
-0.538	4.9360E+04	4.4822E+04	-2.9742E+04
-0.543	4.6606E+04	4.2702E+04	-2.8754E+04
-0.548	4.7528E+04	4.3594E+04	-2.7665E+04
-0.553	4.8472E+04	4.4496E+04	-2.6624E+04
-0.558	4.9432E+04	4.5407E+04	-2.5621E+04
-0.563	5.0392E+04	4.6320E+04	-2.4620E+04
-0.568	5.1352E+04	4.7235E+04	-2.3622E+04
-0.573	5.2312E+04	4.8153E+04	-2.2625E+04
-0.578	5.3275E+04	4.9074E+04	-2.1638E+04
-0.583	5.4319E+04	5.0036E+04	-2.0785E+04
-0.588	5.5362E+04	5.1001E+04	-1.9935E+04
-0.593	5.6406E+04	5.1969E+04	-1.9088E+04
-0.598	5.7449E+04	5.2940E+04	-1.8244E+04
-0.603	5.8493E+04	5.3913E+04	-1.7402E+04
-0.608	5.9536E+04	5.4889E+04	-1.6563E+04
-0.613	6.0580E+04	5.5868E+04	-1.5727E+04
-0.618	6.1633E+04	5.6855E+04	-1.4905E+04
-0.623	6.2818E+04	5.7918E+04	-1.4245E+04
-0.628	6.4003E+04	5.8986E+04	-1.3588E+04

-0.633	6.5188E+04	6.0057E+04	-1.2935E+04
-0.638	6.6373E+04	6.1131E+04	-1.2285E+04
-0.643	6.7557E+04	6.2209E+04	-1.1639E+04
-0.648	6.8742E+04	6.3291E+04	-1.0996E+04
-0.653	6.9927E+04	6.4376E+04	-1.0357E+04
-0.658	7.1112E+04	6.5464E+04	-9.7205E+03
-0.663	7.2339E+04	6.6581E+04	-9.1264E+03
-0.668	7.3718E+04	6.7797E+04	-8.6803E+03
-0.673	7.5098E+04	6.9018E+04	-8.2386E+03
-0.678	7.6478E+04	7.0243E+04	-7.8013E+03
-0.683	7.7857E+04	7.1472E+04	-7.3682E+03
-0.688	7.9237E+04	7.2706E+04	-6.9392E+03
-0.693	8.0617E+04	7.3943E+04	-6.5142E+03
-0.698	8.1997E+04	7.5184E+04	-6.0929E+03
-0.704	8.3424E+04	7.6460E+04	-5.7150E+03
-0.709	8.5008E+04	7.7843E+04	-5.4719E+03
-0.714	8.6592E+04	7.9232E+04	-5.2336E+03
-0.719	8.8176E+04	8.0624E+04	-4.9999E+03
-0.724	8.9760E+04	8.2021E+04	-4.7706E+03
-0.729	9.1343E+04	8.3423E+04	-4.5455E+03
-0.734	9.3022E+04	8.4892E+04	-4.4026E+03
-0.739	9.4738E+04	8.6392E+04	-4.2960E+03

按照本标准附录 B 之要求，开展水泥稳定碎石直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸强度试验。对应的强度结果为 $S_t=1.174\text{MPa}$ ， $S_c=9.98\text{Mpa}$ ， $S_{it}=1.129\text{MPa}$ 。

注：无试验条件时，参考本标准第 5 章材料强度参数模型进行取值。进一步依据式 (1)、(2) 和 (3) 计算三维强度模型参数 $a=0.1632$ ， $b=0.387$ ， $m=1.8175$ 。从而得到水泥稳定碎石层各设计点位的计算有效应力 σ_{ec} 和三维强度模型确定的极限有效应力 $\sigma_{ec}(\theta)$ ，计算结果见表 H.2.4.2-2。

表 H.2.4.2-2 路面结构设计点位三维强度（水泥稳定碎石层 E_i ）

厚度 (m)	第一应力不 变量 I_1 (Pa)	有效应力 σ_{ec} (Pa)	罗德角 θ	压子午线 σ_{ec}^c (Pa)	拉子午线 σ_{ec}^t (Pa)	极限有效应 力 $\sigma_{ec}(\theta)$ (Pa)
-0.181	-3.762E+05	2.084E+05	9.686E-01	3.225E+06	1.774E+06	3.116E+06
-0.186	-3.618E+05	2.028E+05	9.671E-01	3.215E+06	1.769E+06	3.104E+06
-0.191	-3.474E+05	1.973E+05	9.657E-01	3.205E+06	1.763E+06	3.092E+06
-0.196	-3.330E+05	1.918E+05	9.643E-01	3.194E+06	1.758E+06	3.081E+06
-0.201	-3.206E+05	1.873E+05	9.636E-01	3.186E+06	1.753E+06	3.071E+06
-0.206	-3.095E+05	1.833E+05	9.633E-01	3.178E+06	1.748E+06	3.063E+06
-0.211	-2.983E+05	1.794E+05	9.631E-01	3.170E+06	1.744E+06	3.055E+06
-0.216	-2.871E+05	1.755E+05	9.629E-01	3.162E+06	1.740E+06	3.048E+06
-0.221	-2.759E+05	1.716E+05	9.628E-01	3.154E+06	1.735E+06	3.040E+06
-0.226	-2.647E+05	1.677E+05	9.627E-01	3.146E+06	1.731E+06	3.032E+06
-0.231	-2.535E+05	1.639E+05	9.627E-01	3.139E+06	1.727E+06	3.025E+06
-0.236	-2.423E+05	1.600E+05	9.628E-01	3.131E+06	1.723E+06	3.017E+06
-0.241	-2.311E+05	1.562E+05	9.630E-01	3.123E+06	1.718E+06	3.010E+06
-0.246	-2.199E+05	1.524E+05	9.633E-01	3.115E+06	1.714E+06	3.003E+06
-0.251	-2.112E+05	1.496E+05	9.645E-01	3.109E+06	1.710E+06	2.998E+06
-0.256	-2.035E+05	1.472E+05	9.662E-01	3.103E+06	1.707E+06	2.995E+06
-0.261	-1.959E+05	1.448E+05	9.679E-01	3.098E+06	1.705E+06	2.992E+06
-0.266	-1.882E+05	1.424E+05	9.697E-01	3.093E+06	1.702E+06	2.990E+06
-0.271	-1.805E+05	1.401E+05	9.716E-01	3.087E+06	1.699E+06	2.987E+06
-0.276	-1.729E+05	1.377E+05	9.735E-01	3.082E+06	1.696E+06	2.984E+06
-0.281	-1.652E+05	1.353E+05	9.755E-01	3.076E+06	1.693E+06	2.982E+06
-0.286	-1.575E+05	1.329E+05	9.776E-01	3.071E+06	1.690E+06	2.979E+06
-0.291	-1.499E+05	1.306E+05	9.799E-01	3.066E+06	1.687E+06	2.977E+06
-0.296	-1.422E+05	1.282E+05	9.822E-01	3.060E+06	1.684E+06	2.975E+06
-0.302	-1.346E+05	1.258E+05	9.846E-01	3.055E+06	1.681E+06	2.973E+06
-0.307	-1.269E+05	1.235E+05	9.872E-01	3.049E+06	1.678E+06	2.971E+06
-0.312	-1.193E+05	1.212E+05	9.898E-01	3.044E+06	1.675E+06	2.969E+06
-0.317	-1.116E+05	1.188E+05	9.926E-01	3.039E+06	1.672E+06	2.967E+06
-0.322	-1.049E+05	1.167E+05	9.947E-01	3.034E+06	1.669E+06	2.966E+06
-0.327	-1.003E+05	1.152E+05	9.952E-01	3.031E+06	1.668E+06	2.963E+06
-0.332	-9.568E+04	1.136E+05	9.956E-01	3.028E+06	1.666E+06	2.960E+06
-0.337	-9.105E+04	1.121E+05	9.961E-01	3.024E+06	1.664E+06	2.958E+06

-0.342	-8.641E+04	1.105E+05	9.966E-01	3.021E+06	1.662E+06	2.955E+06
-0.347	-8.179E+04	1.090E+05	9.971E-01	3.018E+06	1.660E+06	2.953E+06
-0.352	-7.716E+04	1.074E+05	9.976E-01	3.015E+06	1.659E+06	2.950E+06
-0.357	-7.253E+04	1.059E+05	9.981E-01	3.011E+06	1.657E+06	2.948E+06
-0.362	-6.790E+04	1.043E+05	9.986E-01	3.008E+06	1.655E+06	2.945E+06
-0.367	-6.328E+04	1.027E+05	9.992E-01	3.005E+06	1.653E+06	2.943E+06
-0.372	-5.865E+04	1.012E+05	9.997E-01	3.001E+06	1.651E+06	2.940E+06
-0.377	-5.402E+04	9.964E+04	1.000E+00	2.998E+06	1.650E+06	2.938E+06
-0.382	-4.939E+04	9.809E+04	1.001E+00	2.995E+06	1.648E+06	2.935E+06
-0.387	-4.476E+04	9.653E+04	1.002E+00	2.992E+06	1.646E+06	2.933E+06
-0.392	-4.013E+04	9.498E+04	1.002E+00	2.988E+06	1.644E+06	2.931E+06
-0.397	-3.551E+04	9.342E+04	1.003E+00	2.985E+06	1.642E+06	2.928E+06
-0.402	-3.123E+04	9.216E+04	1.003E+00	2.982E+06	1.641E+06	2.926E+06
-0.407	-2.749E+04	9.136E+04	1.003E+00	2.980E+06	1.639E+06	2.923E+06
-0.412	-2.375E+04	9.055E+04	1.003E+00	2.977E+06	1.638E+06	2.921E+06
-0.417	-2.001E+04	8.975E+04	1.003E+00	2.974E+06	1.636E+06	2.918E+06
-0.422	-1.627E+04	8.895E+04	1.003E+00	2.972E+06	1.635E+06	2.915E+06
-0.427	-1.254E+04	8.815E+04	1.003E+00	2.969E+06	1.634E+06	2.913E+06
-0.432	-8.798E+03	8.735E+04	1.003E+00	2.966E+06	1.632E+06	2.910E+06
-0.437	-5.060E+03	8.655E+04	1.003E+00	2.964E+06	1.631E+06	2.908E+06
-0.442	-1.321E+03	8.576E+04	1.003E+00	2.961E+06	1.629E+06	2.905E+06
-0.447	2.415E+03	8.496E+04	1.003E+00	2.959E+06	1.628E+06	2.902E+06
-0.452	6.153E+03	8.416E+04	1.003E+00	2.956E+06	1.626E+06	2.900E+06
-0.457	9.890E+03	8.337E+04	1.003E+00	2.953E+06	1.625E+06	2.897E+06
-0.462	1.363E+04	8.258E+04	1.003E+00	2.951E+06	1.623E+06	2.895E+06
-0.467	1.737E+04	8.179E+04	1.003E+00	2.948E+06	1.622E+06	2.892E+06
-0.472	2.110E+04	8.100E+04	1.003E+00	2.945E+06	1.621E+06	2.890E+06
-0.477	2.448E+04	8.061E+04	1.003E+00	2.943E+06	1.619E+06	2.887E+06
-0.482	2.785E+04	8.022E+04	1.002E+00	2.941E+06	1.618E+06	2.883E+06
-0.487	3.123E+04	7.983E+04	1.001E+00	2.938E+06	1.617E+06	2.880E+06
-0.492	3.461E+04	7.944E+04	1.001E+00	2.936E+06	1.615E+06	2.877E+06
-0.497	3.799E+04	7.905E+04	1.000E+00	2.934E+06	1.614E+06	2.874E+06
-0.503	4.137E+04	7.867E+04	9.997E-01	2.931E+06	1.613E+06	2.871E+06
-0.508	4.475E+04	7.829E+04	9.992E-01	2.929E+06	1.611E+06	2.868E+06
-0.513	4.813E+04	7.791E+04	9.987E-01	2.926E+06	1.610E+06	2.865E+06
-0.518	5.151E+04	7.754E+04	9.982E-01	2.924E+06	1.609E+06	2.862E+06
-0.523	5.487E+04	7.719E+04	9.977E-01	2.922E+06	1.608E+06	2.860E+06

-0.528	5.806E+04	7.710E+04	9.972E-01	2.919E+06	1.606E+06	2.857E+06
-0.533	6.125E+04	7.702E+04	9.966E-01	2.917E+06	1.605E+06	2.854E+06
-0.538	6.444E+04	7.693E+04	9.961E-01	2.915E+06	1.604E+06	2.851E+06
-0.543	6.055E+04	7.349E+04	1.001E+00	2.918E+06	1.605E+06	2.860E+06
-0.548	6.346E+04	7.331E+04	1.001E+00	2.916E+06	1.604E+06	2.857E+06
-0.553	6.634E+04	7.319E+04	1.000E+00	2.914E+06	1.603E+06	2.855E+06
-0.558	6.922E+04	7.312E+04	9.995E-01	2.912E+06	1.602E+06	2.852E+06
-0.563	7.209E+04	7.306E+04	9.989E-01	2.910E+06	1.601E+06	2.849E+06
-0.568	7.497E+04	7.300E+04	9.983E-01	2.907E+06	1.600E+06	2.846E+06
-0.573	7.784E+04	7.295E+04	9.978E-01	2.905E+06	1.599E+06	2.844E+06
-0.578	8.071E+04	7.290E+04	9.973E-01	2.903E+06	1.598E+06	2.841E+06
-0.583	8.357E+04	7.306E+04	9.964E-01	2.901E+06	1.596E+06	2.838E+06
-0.588	8.643E+04	7.321E+04	9.956E-01	2.899E+06	1.595E+06	2.835E+06
-0.593	8.929E+04	7.338E+04	9.948E-01	2.897E+06	1.594E+06	2.832E+06
-0.598	9.215E+04	7.354E+04	9.941E-01	2.895E+06	1.593E+06	2.829E+06
-0.603	9.500E+04	7.371E+04	9.934E-01	2.893E+06	1.592E+06	2.826E+06
-0.608	9.786E+04	7.389E+04	9.927E-01	2.891E+06	1.591E+06	2.824E+06
-0.613	1.007E+05	7.406E+04	9.921E-01	2.889E+06	1.590E+06	2.821E+06
-0.618	1.036E+05	7.426E+04	9.915E-01	2.887E+06	1.589E+06	2.818E+06
-0.623	1.065E+05	7.473E+04	9.904E-01	2.885E+06	1.588E+06	2.815E+06
-0.628	1.094E+05	7.521E+04	9.894E-01	2.883E+06	1.586E+06	2.812E+06
-0.633	1.123E+05	7.569E+04	9.885E-01	2.881E+06	1.585E+06	2.809E+06
-0.638	1.152E+05	7.617E+04	9.876E-01	2.879E+06	1.584E+06	2.805E+06
-0.643	1.181E+05	7.666E+04	9.867E-01	2.877E+06	1.583E+06	2.802E+06
-0.648	1.210E+05	7.716E+04	9.860E-01	2.875E+06	1.582E+06	2.799E+06
-0.653	1.239E+05	7.766E+04	9.853E-01	2.873E+06	1.581E+06	2.797E+06
-0.658	1.269E+05	7.816E+04	9.846E-01	2.871E+06	1.580E+06	2.794E+06
-0.663	1.298E+05	7.874E+04	9.838E-01	2.869E+06	1.579E+06	2.791E+06
-0.668	1.328E+05	7.960E+04	9.827E-01	2.867E+06	1.577E+06	2.787E+06
-0.673	1.359E+05	8.047E+04	9.817E-01	2.865E+06	1.576E+06	2.784E+06
-0.678	1.389E+05	8.134E+04	9.808E-01	2.863E+06	1.575E+06	2.781E+06
-0.683	1.420E+05	8.222E+04	9.799E-01	2.860E+06	1.574E+06	2.778E+06
-0.688	1.450E+05	8.310E+04	9.791E-01	2.858E+06	1.573E+06	2.775E+06
-0.693	1.480E+05	8.399E+04	9.783E-01	2.856E+06	1.571E+06	2.772E+06
-0.698	1.511E+05	8.489E+04	9.776E-01	2.854E+06	1.570E+06	2.769E+06
-0.704	1.542E+05	8.587E+04	9.769E-01	2.852E+06	1.569E+06	2.766E+06
-0.709	1.574E+05	8.712E+04	9.759E-01	2.850E+06	1.568E+06	2.762E+06

-0.714	1.606E+05	8.838E+04	9.750E-01	2.847E+06	1.567E+06	2.759E+06
-0.719	1.638E+05	8.964E+04	9.742E-01	2.845E+06	1.565E+06	2.756E+06
-0.724	1.670E+05	9.091E+04	9.734E-01	2.843E+06	1.564E+06	2.753E+06
-0.729	1.702E+05	9.218E+04	9.727E-01	2.840E+06	1.563E+06	2.750E+06
-0.734	1.735E+05	9.362E+04	9.719E-01	2.838E+06	1.562E+06	2.746E+06
-0.739	1.768E+05	9.514E+04	9.712E-01	2.836E+06	1.560E+06	2.743E+06

在表 10 的基础上，确定计算点位的有效应力之比，按照本标准表 5.5.4 选取水泥稳定碎石疲劳归一化方程参数 $\gamma = -10$ ，得到水泥稳定碎石疲劳归一化模

型 $N_f = (\Delta)^\gamma = \left(\frac{\sigma_{ec}}{\sigma_{ec}(\theta)} \right)^{-10}$ ，进而反算路面结构疲劳寿命，同时按照本标准表

3.0.4 的设计年限要求，计算水泥稳定碎石 60 年的设计交通量，计算结果见表 H.2.4.2-3。

表 H.2.4.2-3 路面结构设计点位疲劳开裂寿命验算结果（水泥稳定碎石层 E_i ）

厚度	有效应力之比 $\Delta = \frac{\sigma_{ec}}{\sigma_{ec}(\theta)}$	疲劳开裂寿命 N_f	设计交通量
-0.181	0.066870103	1.598E+12	4.785E+10
-0.186	0.065333345	2.016E+12	4.785E+10
-0.191	0.063790366	2.561E+12	4.785E+10
-0.196	0.062247109	3.271E+12	4.785E+10
-0.201	0.0609671	4.027E+12	4.785E+10
-0.206	0.059840243	4.853E+12	4.785E+10
-0.211	0.058710666	5.872E+12	4.785E+10
-0.216	0.057579028	7.133E+12	4.785E+10
-0.221	0.056444667	8.704E+12	4.785E+10
-0.226	0.055311264	1.066E+13	4.785E+10
-0.231	0.054175155	1.312E+13	4.785E+10
-0.236	0.053036964	1.622E+13	4.785E+10
-0.241	0.051896086	2.016E+13	4.785E+10
-0.246	0.050759287	2.516E+13	4.785E+10
-0.251	0.049890745	2.990E+13	4.785E+10
-0.256	0.049142359	3.478E+13	4.785E+10
-0.261	0.048391299	4.058E+13	4.785E+10
-0.266	0.047641057	4.744E+13	4.785E+10
-0.271	0.046888493	5.562E+13	4.785E+10

-0.276	0.046133569	6.543E+13	4.785E+10
-0.281	0.045376298	7.720E+13	4.785E+10
-0.286	0.04461671	9.140E+13	4.785E+10
-0.291	0.043857941	1.085E+14	4.785E+10
-0.296	0.04309692	1.293E+14	4.785E+10
-0.302	0.042333617	1.546E+14	4.785E+10
-0.307	0.041571227	1.854E+14	4.785E+10
-0.312	0.04080662	2.232E+14	4.785E+10
-0.317	0.040039825	2.698E+14	4.785E+10
-0.322	0.039365503	3.197E+14	4.785E+10
-0.327	0.038874157	3.625E+14	4.785E+10
-0.332	0.038384973	4.115E+14	4.785E+10
-0.337	0.037891569	4.683E+14	4.785E+10
-0.342	0.037397176	5.340E+14	4.785E+10
-0.347	0.036903665	6.099E+14	4.785E+10
-0.352	0.036408454	6.981E+14	4.785E+10
-0.357	0.035912186	8.008E+14	4.785E+10
-0.362	0.035414534	9.207E+14	4.785E+10
-0.367	0.034915837	1.061E+15	4.785E+10
-0.372	0.034416366	1.225E+15	4.785E+10
-0.377	0.033915826	1.419E+15	4.785E+10
-0.382	0.033413929	1.647E+15	4.785E+10
-0.387	0.032911244	1.916E+15	4.785E+10
-0.392	0.032407514	2.236E+15	4.785E+10
-0.397	0.031902704	2.616E+15	4.785E+10
-0.402	0.031497557	2.973E+15	4.785E+10
-0.407	0.031251061	3.216E+15	4.785E+10
-0.412	0.031004785	3.481E+15	4.785E+10
-0.417	0.030757789	3.770E+15	4.785E+10
-0.422	0.030510706	4.087E+15	4.785E+10
-0.427	0.030263515	4.433E+15	4.785E+10
-0.432	0.030015929	4.813E+15	4.785E+10
-0.437	0.029768222	5.229E+15	4.785E+10
-0.442	0.02952047	5.685E+15	4.785E+10
-0.447	0.029272257	6.185E+15	4.785E+10
-0.452	0.029024317	6.735E+15	4.785E+10
-0.457	0.028775616	7.340E+15	4.785E+10

-0.462	0.028527187	8.005E+15	4.785E+10
-0.467	0.028278615	8.737E+15	4.785E+10
-0.472	0.028033275	9.532E+15	4.785E+10
-0.477	0.027926439	9.903E+15	4.785E+10
-0.482	0.02782011	1.029E+16	4.785E+10
-0.487	0.02771405	1.069E+16	4.785E+10
-0.492	0.027608528	1.110E+16	4.785E+10
-0.497	0.027503242	1.154E+16	4.785E+10
-0.503	0.027398861	1.198E+16	4.785E+10
-0.508	0.027294715	1.245E+16	4.785E+10
-0.513	0.027191109	1.293E+16	4.785E+10
-0.518	0.027088074	1.343E+16	4.785E+10
-0.523	0.026994008	1.391E+16	4.785E+10
-0.528	0.026990414	1.393E+16	4.785E+10
-0.533	0.02698726	1.394E+16	4.785E+10
-0.538	0.026985504	1.395E+16	4.785E+10
-0.543	0.025694717	2.278E+16	4.785E+10
-0.548	0.025654783	2.313E+16	4.785E+10
-0.553	0.025638399	2.328E+16	4.785E+10
-0.558	0.025640272	2.327E+16	4.785E+10
-0.563	0.025642896	2.324E+16	4.785E+10
-0.568	0.025646608	2.321E+16	4.785E+10
-0.573	0.025650762	2.317E+16	4.785E+10
-0.578	0.025659376	2.309E+16	4.785E+10
-0.583	0.025740995	2.237E+16	4.785E+10
-0.588	0.025823525	2.167E+16	4.785E+10
-0.593	0.025907622	2.097E+16	4.785E+10
-0.598	0.025992628	2.030E+16	4.785E+10
-0.603	0.026078833	1.964E+16	4.785E+10
-0.608	0.026165946	1.899E+16	4.785E+10
-0.613	0.026254624	1.836E+16	4.785E+10
-0.618	0.026351388	1.770E+16	4.785E+10
-0.623	0.026549127	1.642E+16	4.785E+10
-0.628	0.026748337	1.524E+16	4.785E+10
-0.633	0.026949303	1.414E+16	4.785E+10
-0.638	0.027151683	1.312E+16	4.785E+10
-0.643	0.027355508	1.218E+16	4.785E+10

-0.648	0.027561103	1.130E+16	4.785E+10
-0.653	0.02776845	1.048E+16	4.785E+10
-0.658	0.027977037	9.726E+15	4.785E+10
-0.663	0.028215246	8.935E+15	4.785E+10
-0.668	0.02855798	7.919E+15	4.785E+10
-0.673	0.028903228	7.022E+15	4.785E+10
-0.678	0.029250628	6.231E+15	4.785E+10
-0.683	0.029599768	5.534E+15	4.785E+10
-0.688	0.029951315	4.918E+15	4.785E+10
-0.693	0.030304849	4.373E+15	4.785E+10
-0.698	0.030660289	3.892E+15	4.785E+10
-0.704	0.031047995	3.432E+15	4.785E+10
-0.709	0.031538652	2.934E+15	4.785E+10
-0.714	0.032031899	2.512E+15	4.785E+10
-0.719	0.032527603	2.155E+15	4.785E+10
-0.724	0.033025735	1.851E+15	4.785E+10
-0.729	0.033525881	1.593E+15	4.785E+10
-0.734	0.034089707	1.348E+15	4.785E+10
-0.739	0.034680426	1.135E+15	4.785E+10

从上述计算结果来看，水泥稳定碎石基层疲劳寿命均满足设计年限要求。

JTG D50-2017 计算结果：

设计层厚度 $H(5)=200\text{ mm}$

季节性冻土地区调整系数 $K_A=0.8$

温度调整系数 $K_{T2}=1.232$

现场综合修正系数 $K_C=-1.419$

第 5 层层底拉应力 $\sigma=0.122\text{ MPa}$

第 5 层无机结合料稳定层疲劳开裂寿命 $N_{F2}=5.467285\text{ E}+09$ 轴次

设计使用年限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数
 $N_{ZB2}=2.312413\text{ E}+09$ 轴次

第 5 层无机结合料稳定层疲劳开裂验算已满足设计要求。

H.2.4.3 沥青混合料层永久变形量

按照 JTG D50-2017 计算方法进行计算，本算例结果由计算软件 HPDS2017 得到。

路面结构的层数:6

设计轴载: 100 kN

路面设计层层位: 5

设计层起始厚度: 280 (mm)

表 H.2.4.3-1 路面结构及材料参数 (JTG D50-2017 规定)

层位	结构层材料名称	厚度 (mm)	模量 (MPa)	泊松比	水泥稳定碎石 弯拉强度 (MPa)	永久变形 量(mm)
1	细粒式沥青混凝土	40	11000	0.25		1.5
2	中粒式沥青混凝土	60	10000	0.25		1.8
3	粗粒式沥青混凝土	80	9000	0.25		2
4	水泥稳定碎石	360	11500	0.25	1.75	
5	水泥稳定碎石	200	10000	0.25	1.6	
6	级配碎石	150	400	0.35		
7	新建路基	80		0.4		

沥青混合料层永久变形等效温度 $TPEF = 26.7^{\circ}\text{C}$

通车至首次针对车辙维修的期限内 (15 年) 设计车道上的当量设计轴载累计作用次数 $NZB3 = 3.082682\text{E}+07$ 轴次。

沥青混合料层永久变形验算分层数 $N = 6$

第 1 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(1) = 1.64 \text{ mm}$

第 2 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(2) = 2.93 \text{ mm}$

第 3 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(3) = 3.49 \text{ mm}$

第 4 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(4) = 2.53 \text{ mm}$

第 5 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(5) = 1.55 \text{ mm}$

第 6 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(6) = 2.19 \text{ mm}$

沥青混合料层永久变形量 $RA = 14.33 \text{ mm}$

沥青混合料层容许永久变形量 $RAR = 15 \text{ mm}$

沥青混合料层永久变形量满足 JTG D50-2017 规范要求。

第 1 层沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求为 5139 次/mm;

第 2 层沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求为 3923 次/mm;

第 3 层沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求为 3357 次/mm。

H.2.4.4 低温开裂指数

路面所在地区低温设计温度 $TSJ = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

表面层沥青弯曲梁流变试验蠕变劲度 $ST = 260\text{ MPa}$

沥青结合料类材料层厚度 $HA = 180\text{ mm}$

路基类型参数 $BLJ = 2$

沥青面层低温开裂指数 $CI = 0.1$ 条

沥青面层容许低温开裂指数 $CIR = 3$ 条

沥青面层低温开裂指数值满足 JTG D50-2017 规范要求。

H.2.4.5 路基顶面竖向压应变

当验算路基顶面竖向压应变时:设计使用年限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数为 $5.417452\text{E}+07$ 。

对于半刚性基层沥青路面结构,无需计算路基顶面竖向压应变指标。

可计算设计路面结构的验收弯沉值:

干湿循环或冻融循环条件下路基土模量折减系数 $KAT = 0.9$

路基顶面验收弯沉值 $LG = 210.1\text{ (}0.01\text{mm)}$

路表验收弯沉值 $LA = 16.1\text{ (}0.01\text{mm)}$

H.2.4.6 结论

综合本标准和 JTG D50-2017 规定,拟定结构满足寿命逐层递增式耐久性沥青路面结构要求。

算例二

H.2.1 交通参数

该项目位于湖南省，属于高速公路，设计年限按照本标准 3.0.4 实施，根据交通量 OD 调查分析，断面大型客车和货车交通量为 3250 辆/日，交通量年增长率为 5.7%，方向系数取 0.6，车道系数取 0.5。根据交通历史数据，按 JTG D50-2017 表 A.2.6-1 确定该设计公路为 TTC3 类，根据 JTG D50-2017 表 A.2.6-2 得到车辆类型分布系数如表 H.2.1-1 所示。

表 H.2.1-1 车辆类型分布系数

车辆类型	2类	3类	4类	5类	6类	7类	8类	9类	10类	11类
车型分布系数(%)	17.8	33.1	3.4	0.0	12.5	4.4	9.1	10.6	8.5	0.7

根据路网相邻公路的车辆满载情况及历史数据的调查分析，得到各类车型非满载与满载比例，如表 H.2.1-2 所示。

表 H.2.1-2 非满载车与满载车所占比例(%)

车辆类型	2类	3类	4类	5类	6类	7类	8类	9类	10类	11类
非满载车比例	85.0	90.0	65.0	75.0	55.0	70.0	45.0	60.0	55.0	65.0
满载车比例	15.0	10.0	35.0	25.0	45.0	30.0	55.0	40.0	45.0	35.0

根据本标准与 JTG D50-2017 表 6.2.1 之要求，该设计路面对应的设计指标为沥青混合料层有效应力、沥青混合料层永久变形与无机结合料层疲劳开裂。根据 JTG D50-2017 附表 A.3.1-3，可得到在不同设计指标下，各车型对应的非满载车和满载车当量设计轴载换算系数，如表 H.2.1-3 所示。

表 H.2.1-3 非满载车与满载车当量设计轴载换算系数

设计指标	沥青混合料层永久变形 沥青混合料层有效应力		无机结合料层有效应力	
	非满载车	满载车	非满载车	满载车
2类	0.8	2.8	0.5	35.5
3类	0.4	4.1	1.3	314.2
4类	0.7	4.2	0.3	137.6
5类	0.6	6.3	0.6	72.9
6类	1.3	7.9	10.2	1505.7
7类	1.4	6.0	7.8	553.0
8类	1.4	6.7	16.4	713.5
9类	1.5	5.1	0.7	204.3

10类	2.4	7.0	37.8	426.8
11类	1.5	12.1	2.5	985.4

根据 JTG D50-2017 公式 (A.4.2) 计算得到对应于沥青混合料层永久变形和疲劳开裂的 15 年当量设计轴载累计作用次数为 18,564,637,对应于无机结合料层疲劳开裂的当量设计轴载累计作用次数为 1,392,589,884。本公路设计使用年限为 15 年内设计车道累计大型客车和货车交通量为 8,096,522, 交通等级属于重交通。

H.2.2 环境参数

沥青混合料层疲劳开裂寿命、无机结合料稳定层疲劳开裂寿命和路基顶面竖向压应变验算时, 根据所在地的气温条件、路面结构类型和结构层厚度, 按 JTG D50-2017 附录 H 确定温度调整系数。沥青混合料层永久变形量验算时, 根据所在地的气温条件, 按 JTG D50-2017 附录 H 选用相应的等效温度, 见表 H.2.2-1。

表 H.2.2-1 基准路面结构温度调整系数和等效温度

地名	省(自治区、直辖市)	最热月平均气温(°C)	最冷月平均气温(°C)	年平均气温(°C)	温度调整系数		基准等效温度
					沥青混合料层有效应力、无机结合料稳定层有效应力	路基顶面竖向压应变	
常宁	湖南	29.1	6.0	18.1	1.45	1.31	23.9

H.2.3 路面结构组合及材料参数

路面结构验算时结构层模量取值按本标准第 5 章确定。拉、压模量取值: 沥青面层采用 15°C、10Hz 条件下的动态拉、压模量, 沥青结合料类基层采用 15°C、5Hz 条件下的动态拉、压模量。无机结合料稳定层采用经结构和湿度调整系数修正后的拉、压弹性模量。

粒料层采用经过湿度调整的回弹模量, 路基采用平衡湿度状态下考虑干湿冻融循环作用后的顶面当量回弹模量。

表 H.2.3-1 路面结构组合及结构层厚度

结构层位	结构层	厚度 (mm)	压模量(MPa)	拉模量(MPa)	压泊 松比	拉泊松 比
表面层	改性 AC-13/SMA-13	40	11000	5500	0.25	0.12500
中面层	改性 AC-20	60	10000	5000	0.25	0.12500
下面层	AC-25	80	9000	4000	0.25	0.11111
基层	水泥稳定碎石	400	11500	7000	0.25	0.15217
刚度过渡层	级配碎石	400	400	-	0.35	
	路基		80MPa		0.4	

H.2.4 路面结构验算

路面结构验算时，对沥青混合料层有效应力和无机结合料稳定层有效应力设计指标，在其对应的结构层内用全域搜索法取最大力学响应量。

H.2.4.1 沥青混合料层有效应力（疲劳寿命）

根据拟定的路面结构厚度和设定的材料参数，采用数值计算软件或者本标准配套软件 Mroad <https://mroad.mailsoft.com/main#> 进行路面结构主应力计算，计算点位如图 H.2.4.1-1 所示。

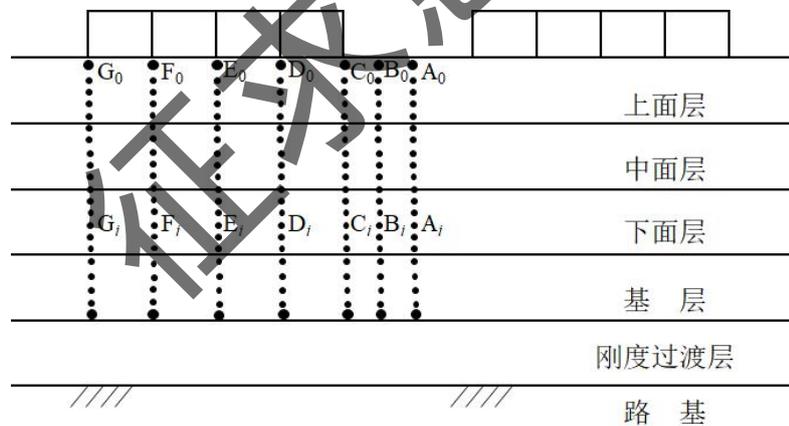


图 H.2.4.1-1 路面结构的强度校核点示意图

本算例在水平方向选取 A、B、C、D、E、F、G 七个点位，竖直方向以上面层层顶为原点，以 0.5cm 为步长，依次选取相应点位。以行车方向为 Y 方向，路面横向为 X 方向，竖直方向为 Z 方向，着重考虑这些点位的主应力，计算结果见表 H.2.4.1-1，规定主应力以受拉为正。由于数据较多，此处仅放置了 C_i 点位的计算结果。

表 H.2.4.1-1 路面结构设计点位主应力计算结果（沥青混合料层，以 C_i 点位为例）

厚度(m)	第一主应力 σ_1	第二主应力 σ_2	第三主应力 σ_3
0	-1.5497E+05	-4.5900E+05	-5.9028E+05
-0.005	-4.9859E+04	-4.6772E+05	-4.9622E+05
-0.01	-4.6333E+04	-4.2206E+05	-5.3457E+05
-0.015	-7.3022E+04	-3.9528E+05	-5.5242E+05
-0.02	-8.6101E+04	-3.6412E+05	-5.4998E+05
-0.025	-9.7533E+04	-3.3279E+05	-5.4425E+05
-0.03	-1.0774E+05	-3.0328E+05	-5.3067E+05
-0.035	-1.1530E+05	-2.7470E+05	-5.1532E+05
-0.04	-1.1455E+05	-2.3649E+05	-4.9227E+05
-0.045	-1.1853E+05	-2.1715E+05	-4.7672E+05
-0.05	-1.2230E+05	-1.9918E+05	-4.6134E+05
-0.055	-1.2552E+05	-1.8394E+05	-4.4634E+05
-0.06	-1.2858E+05	-1.6941E+05	-4.3144E+05
-0.065	-1.3138E+05	-1.5609E+05	-4.1682E+05
-0.07	-1.3377E+05	-1.4460E+05	-4.0261E+05
-0.075	-1.3311E+05	-1.3612E+05	-3.8844E+05
-0.08	-1.2313E+05	-1.3808E+05	-3.7479E+05
-0.085	-1.1368E+05	-1.3984E+05	-3.6138E+05
-0.09	-1.0462E+05	-1.4142E+05	-3.4824E+05
-0.095	-9.6306E+04	-1.4275E+05	-3.3552E+05
-0.101	-8.8762E+04	-1.3617E+05	-3.2036E+05
-0.106	-8.3869E+04	-1.3566E+05	-3.0991E+05
-0.111	-7.9412E+04	-1.3475E+05	-3.0001E+05
-0.116	-7.5053E+04	-1.3358E+05	-2.9038E+05
-0.121	-7.1541E+04	-1.3178E+05	-2.8168E+05
-0.126	-6.8030E+04	-1.2978E+05	-2.7318E+05
-0.131	-6.4518E+04	-1.2757E+05	-2.6489E+05
-0.136	-6.1887E+04	-1.2482E+05	-2.5752E+05
-0.141	-5.9341E+04	-1.2187E+05	-2.5039E+05
-0.146	-5.6795E+04	-1.1874E+05	-2.4345E+05
-0.151	-5.4555E+04	-1.1537E+05	-2.3690E+05
-0.156	-5.2837E+04	-1.1177E+05	-2.3083E+05
-0.161	-5.1120E+04	-1.0804E+05	-2.2490E+05
-0.166	-4.9513E+04	-1.0419E+05	-2.1915E+05

-0.171	-4.8422E+04	-1.0021E+05	-2.1376E+05
-0.176	-4.7331E+04	-9.6165E+04	-2.0845E+05

按照本标准附录 B 之要求, 开展沥青混合料直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸强度试验, 加载速度为 $v = \frac{0.7}{0.213/(80/3.6)} = 73 \text{MPa/s}$ (选定行车速度为

80km/h)。对应的换算强度结果为 $S_t=5.255\text{MPa}$, $S_c=25.213\text{MPa}$, $S_{it}=3.821\text{MPa}$ 。

注: 无试验条件时, 参考本标准第 5 章材料强度参数模型进行取值。进一步依据式 (H.2.4.1-1)、(H.2.4.1-2) 和 (H.2.4.1-3) 计算三维强度模型参数 $a=0.3119, b=0.4964, m=1.2372$ 。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{3\theta}{\pi} S_t (S_c - 2S_{it}) \\ k_2 = \frac{6\theta}{\pi} (S_t + S_c) S_{it} + S_t (S_c - 2S_{it}) - \sqrt{13} S_{it} (S_t + S_c) \\ k_3 = (1 - \frac{3\theta}{\pi}) S_c (S_t + 2S_{it}) \end{cases} \quad (\text{H.2.4.1-1})$$

$$\begin{cases} a = \frac{\frac{S_t + S_c}{S_t + S_c}}{m} \\ b = \frac{\frac{S_c - S_t}{S_t + S_c}}{m} \end{cases} \quad (\text{H.2.4.1-2})$$

$$m = \frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4k_1k_3}}{2k_1} \quad (\text{H.2.4.1-3})$$

注: θ 为间接拉伸强度对应的罗德角, 为 46°C 。

根据计算得到的三维强度模型参数, 确定三维应力状态下沥青混合料层有效应力强度模型。

$$\text{拉子午线: } \sigma_{ea}^t / S_c = a - b(I_1 / S_c)$$

$$\text{压子午线: } \sigma_{ea}^c / S_c = m[a - b(I_1 / S_c)]$$

$$\text{有效应力强度包络面: } \sigma_{ea}(\theta) = \sigma_{ea}^t - (\sigma_{ea}^t - \sigma_{ea}^c) 3\theta / \pi$$

计算得到各设计点位的有效应力 σ_{ea} 和三维强度模型确定的极限有效应力 $\sigma_{ea}(\theta)$ ，计算结果见表 H.2.4.1-2。

表 H.2.4.1-2 路面结构设计点位三维强度（沥青混合料层 C_i ）

厚度 (m)	第一应力不 变量 I_1 (Pa)	有效应力 σ_{ea} (Pa)	罗德角 θ	压子午线 σ_{ea}^c (Pa)	拉子午线 σ_{ea}^t (Pa)	极限有效应力 $\sigma_{ea}(\theta)$ (Pa)
0	-1.204E+06	3.868E+05	2.984E-01	1.047E+07	8.462E+06	9.034E+06
-0.005	-1.014E+06	4.328E+05	5.706E-02	1.035E+07	8.367E+06	8.475E+06
-0.01	-1.003E+06	4.428E+05	2.218E-01	1.035E+07	8.362E+06	8.782E+06
-0.015	-1.021E+06	4.233E+05	3.273E-01	1.036E+07	8.371E+06	8.991E+06
-0.02	-1.000E+06	4.044E+05	4.094E-01	1.034E+07	8.360E+06	9.136E+06
-0.025	-9.746E+05	3.871E+05	4.929E-01	1.033E+07	8.348E+06	9.280E+06
-0.03	-9.417E+05	3.666E+05	5.671E-01	1.031E+07	8.331E+06	9.401E+06
-0.035	-9.053E+05	3.488E+05	6.403E-01	1.029E+07	8.313E+06	9.519E+06
-0.04	-8.433E+05	3.339E+05	7.254E-01	1.025E+07	8.283E+06	9.643E+06
-0.045	-8.124E+05	3.205E+05	7.774E-01	1.023E+07	8.267E+06	9.723E+06
-0.05	-7.828E+05	3.079E+05	8.292E-01	1.021E+07	8.253E+06	9.803E+06
-0.055	-7.558E+05	2.960E+05	8.754E-01	1.019E+07	8.239E+06	9.873E+06
-0.06	-7.294E+05	2.846E+05	9.227E-01	1.018E+07	8.226E+06	9.945E+06
-0.065	-7.043E+05	2.739E+05	9.690E-01	1.016E+07	8.214E+06	1.002E+07
-0.07	-6.810E+05	2.636E+05	1.012E+00	1.015E+07	8.202E+06	1.008E+07
-0.075	-6.577E+05	2.538E+05	1.037E+00	1.013E+07	8.190E+06	1.011E+07
-0.08	-6.360E+05	2.445E+05	9.942E-01	1.012E+07	8.180E+06	1.002E+07
-0.085	-6.149E+05	2.357E+05	9.509E-01	1.011E+07	8.169E+06	9.929E+06
-0.09	-5.943E+05	2.275E+05	9.066E-01	1.009E+07	8.159E+06	9.834E+06
-0.095	-5.746E+05	2.197E+05	8.631E-01	1.008E+07	8.149E+06	9.742E+06
-0.101	-5.453E+05	2.119E+05	8.522E-01	1.006E+07	8.135E+06	9.705E+06
-0.106	-5.294E+05	2.051E+05	8.267E-01	1.005E+07	8.127E+06	9.649E+06
-0.111	-5.142E+05	1.988E+05	8.037E-01	1.005E+07	8.119E+06	9.597E+06
-0.116	-4.990E+05	1.928E+05	7.812E-01	1.004E+07	8.112E+06	9.547E+06
-0.121	-4.850E+05	1.874E+05	7.651E-01	1.003E+07	8.105E+06	9.509E+06
-0.126	-4.710E+05	1.823E+05	7.495E-01	1.002E+07	8.098E+06	9.472E+06
-0.131	-4.570E+05	1.775E+05	7.344E-01	1.001E+07	8.091E+06	9.437E+06
-0.136	-4.442E+05	1.730E+05	7.267E-01	1.000E+07	8.084E+06	9.415E+06
-0.141	-4.316E+05	1.687E+05	7.204E-01	9.994E+06	8.078E+06	9.396E+06

-0.146	-4.190E+05	1.647E+05	7.154E-01	9.987E+06	8.072E+06	9.380E+06
-0.151	-4.068E+05	1.608E+05	7.135E-01	9.979E+06	8.066E+06	9.369E+06
-0.156	-3.954E+05	1.571E+05	7.162E-01	9.972E+06	8.060E+06	9.368E+06
-0.161	-3.841E+05	1.535E+05	7.202E-01	9.965E+06	8.055E+06	9.368E+06
-0.166	-3.729E+05	1.500E+05	7.260E-01	9.958E+06	8.049E+06	9.373E+06
-0.171	-3.624E+05	1.465E+05	7.360E-01	9.952E+06	8.044E+06	9.385E+06
-0.176	-3.519E+05	1.431E+05	7.472E-01	9.694E+06	7.259E+06	8.997E+06

在表 H.2.4.1-2 的基础上，确定计算点位的有效应力之比，按照本标准表 5.5.4 选取沥青混合料疲劳归一化方程参数 $\gamma = 5.46$ ，得到沥青混合料疲劳归一化

模型 $N_f = (\Delta)^\gamma = \left(\frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{ea}(\theta)} \right)^{-5.46}$ ，进而反算路面结构疲劳寿命，同时按照本标准表

3.0.4 的设计年限要求，计算中上面层 15 年，下面层 30 年的设计交通量，计算结果见表 H.2.4.1-3。

表 H.2.4.1-3 路面结构设计点位疲劳开裂寿命验算结果（沥青混合料层 C_i）

厚度	有效应力之比 $\Delta = \frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{ea}(\theta)}$	疲劳开裂寿命 N_f	设计交通量
0	0.042813296	3.282E+08	1.856E+07
-0.005	0.051067718	1.253E+08	1.856E+07
-0.01	0.050425323	1.343E+08	1.856E+07
-0.015	0.047079372	1.954E+08	1.856E+07
-0.02	0.044262014	2.737E+08	1.856E+07
-0.025	0.041709832	3.785E+08	1.856E+07
-0.03	0.038995318	5.465E+08	1.856E+07
-0.035	0.03664233	7.676E+08	1.856E+07
-0.04	0.034623539	1.046E+09	1.856E+07
-0.045	0.032959941	1.368E+09	1.856E+07
-0.05	0.031408591	1.780E+09	1.856E+07
-0.055	0.029977836	2.296E+09	1.856E+07
-0.06	0.02862189	2.957E+09	1.856E+07
-0.065	0.027347624	3.791E+09	1.856E+07
-0.07	0.026146457	4.845E+09	1.856E+07
-0.075	0.025097443	6.058E+09	1.856E+07
-0.08	0.024399822	7.066E+09	1.856E+07

-0.085	0.023740219	8.206E+09	1.856E+07
-0.09	0.023129279	9.462E+09	1.856E+07
-0.095	0.022551681	1.086E+10	1.856E+07
-0.101	0.021835318	1.296E+10	6.120E+07
-0.106	0.021257965	1.500E+10	6.120E+07
-0.111	0.020713406	1.728E+10	6.120E+07
-0.116	0.020199263	1.982E+10	6.120E+07
-0.121	0.019709764	2.266E+10	6.120E+07
-0.126	0.019244868	2.581E+10	6.120E+07
-0.131	0.018804894	2.929E+10	6.120E+07
-0.136	0.018372291	3.326E+10	6.120E+07
-0.141	0.017954821	3.770E+10	6.120E+07
-0.146	0.017555308	4.263E+10	6.120E+07
-0.151	0.017162833	4.823E+10	6.120E+07
-0.156	0.016764901	5.482E+10	6.120E+07
-0.161	0.016379708	6.224E+10	6.120E+07
-0.166	0.016000956	7.071E+10	6.120E+07
-0.171	0.015608046	8.099E+10	6.120E+07
-0.176	0.015905255	7.307E+10	6.120E+07

从上述计算结果来看，沥青混合料层疲劳寿命均满足设计年限要求。

H.2.4.2 无机结合料层有效应力（疲劳寿命）

按照沥青层的计算方法，得到设计点位的主应力大小，见表 H.2.4.2-1，同理，以最不利位置 F_1 为例。

表 H.2.4.2-1 路面结构设计点位主应力计算结果（水泥稳定碎石层，以 F_1 点位为例）

厚度(m)	第一主应力 σ_1	第二主应力 σ_2	第三主应力 σ_3
-0.181	-3.3161E+04	-3.9939E+04	-2.4900E+05
-0.186	-2.9850E+04	-3.6377E+04	-2.4121E+05
-0.191	-2.6537E+04	-3.2816E+04	-2.3342E+05
-0.196	-2.3221E+04	-2.9255E+04	-2.2564E+05
-0.201	-2.0105E+04	-2.5875E+04	-2.1820E+05
-0.206	-1.7635E+04	-2.3076E+04	-2.1184E+05
-0.211	-1.5164E+04	-2.0277E+04	-2.0549E+05
-0.216	-1.2692E+04	-1.7478E+04	-1.9913E+05
-0.221	-1.0221E+04	-1.4679E+04	-1.9278E+05

-0.226	-7.7498E+03	-1.1879E+04	-1.8643E+05
-0.231	-5.2782E+03	-9.0803E+03	-1.8007E+05
-0.236	-2.8065E+03	-6.2811E+03	-1.7372E+05
-0.241	-3.3461E+02	-3.4819E+03	-1.6736E+05
-0.246	2.1375E+03	-6.8279E+02	-1.6101E+05
-0.251	4.6098E+03	2.1164E+03	-1.5466E+05
-0.256	6.8700E+03	4.6740E+03	-1.4878E+05
-0.261	8.2535E+03	6.2341E+03	-1.4487E+05
-0.266	9.6374E+03	7.7941E+03	-1.4097E+05
-0.271	1.1022E+04	9.3542E+03	-1.3706E+05
-0.276	1.2406E+04	1.0914E+04	-1.3316E+05
-0.281	1.3791E+04	1.2474E+04	-1.2925E+05
-0.286	1.5177E+04	1.4034E+04	-1.2535E+05
-0.291	1.6563E+04	1.5594E+04	-1.2145E+05
-0.296	1.7949E+04	1.7154E+04	-1.1754E+05
-0.302	1.9336E+04	1.8715E+04	-1.1364E+05
-0.307	2.0724E+04	2.0275E+04	-1.0974E+05
-0.312	2.2112E+04	2.1835E+04	-1.0584E+05
-0.317	2.3500E+04	2.3395E+04	-1.0193E+05
-0.322	2.4955E+04	2.4890E+04	-9.8034E+04
-0.327	2.6515E+04	2.6280E+04	-9.4135E+04
-0.332	2.8075E+04	2.7671E+04	-9.0236E+04
-0.337	2.9646E+04	2.9050E+04	-8.6676E+04
-0.342	3.1255E+04	3.0390E+04	-8.4211E+04
-0.347	3.2864E+04	3.1734E+04	-8.1749E+04
-0.352	3.4473E+04	3.3081E+04	-7.9291E+04
-0.357	3.6081E+04	3.4431E+04	-7.6836E+04
-0.362	3.7690E+04	3.5785E+04	-7.4384E+04
-0.367	3.9299E+04	3.7143E+04	-7.1937E+04
-0.372	4.0907E+04	3.8504E+04	-6.9492E+04
-0.377	4.2516E+04	3.9870E+04	-6.7052E+04
-0.382	4.4125E+04	4.1239E+04	-6.4616E+04
-0.387	4.5734E+04	4.2612E+04	-6.2183E+04
-0.392	4.7342E+04	4.3989E+04	-5.9755E+04

-0.397	4.8951E+04	4.5371E+04	-5.7332E+04
-0.402	5.0560E+04	4.6757E+04	-5.4912E+04
-0.407	5.2168E+04	4.8148E+04	-5.2498E+04
-0.412	5.3777E+04	4.9543E+04	-5.0088E+04
-0.417	5.5386E+04	5.0944E+04	-4.7683E+04
-0.422	5.6995E+04	5.2349E+04	-4.5283E+04
-0.427	5.8735E+04	5.3751E+04	-4.3272E+04
-0.432	6.0594E+04	5.5155E+04	-4.1619E+04
-0.437	6.2453E+04	5.6570E+04	-3.9977E+04
-0.442	6.4313E+04	5.7995E+04	-3.8347E+04
-0.447	6.6172E+04	5.9432E+04	-3.6727E+04
-0.452	6.8031E+04	6.0879E+04	-3.5118E+04
-0.457	6.9891E+04	6.2338E+04	-3.3521E+04
-0.462	7.1750E+04	6.3808E+04	-3.1934E+04
-0.467	7.3609E+04	6.5289E+04	-3.0359E+04
-0.472	7.5468E+04	6.6782E+04	-2.8795E+04
-0.477	7.7328E+04	6.8286E+04	-2.7243E+04
-0.482	7.9187E+04	6.9801E+04	-2.5702E+04
-0.487	8.1046E+04	7.1327E+04	-2.4172E+04
-0.492	8.2906E+04	7.2865E+04	-2.2653E+04
-0.497	8.4765E+04	7.4414E+04	-2.1146E+04
-0.503	8.6624E+04	7.5974E+04	-1.9650E+04
-0.508	8.8763E+04	7.7632E+04	-1.8482E+04
-0.513	9.1117E+04	7.9374E+04	-1.7576E+04
-0.518	9.3471E+04	8.1137E+04	-1.6690E+04
-0.523	9.5825E+04	8.2920E+04	-1.5824E+04
-0.528	9.8180E+04	8.4722E+04	-1.4977E+04
-0.533	1.0053E+05	8.6542E+04	-1.4149E+04
-0.538	1.0289E+05	8.8381E+04	-1.3340E+04
-0.543	1.0524E+05	9.0237E+04	-1.2547E+04
-0.548	1.0760E+05	9.2111E+04	-1.1772E+04
-0.553	1.0995E+05	9.4001E+04	-1.1014E+04
-0.558	1.1230E+05	9.5906E+04	-1.0271E+04

按照本标准附录 B 之要求，开展水泥稳定碎石直接拉伸、单轴压缩、间接拉伸强度试验。对应的强度结果为 $S_t=1.174\text{MPa}$ ， $S_c=9.98\text{Mpa}$ ， $S_{tr}=1.129\text{MPa}$ 。
注：无试验条件时，参考本标准第 5 章材料强度参数模型进行取值。进一步依据式 (1)、(2) 和 (3) 计算三维强度模型参数 $a=0.1632$ ， $b=0.387$ ， $m=1.8175$ 。从而计算得到水泥稳定碎石层各设计点位的有效应力 σ_{ec} 和三维强度模型确定的极限有效应力 $\sigma_{ec}(\theta)$ ，计算结果见表 H.2.4.2-2。

表 H.2.4.2-2 路面结构设计点位三维强度（水泥稳定碎石层 F_i ）

厚度 (m)	第一应力不 变量 I_1 (Pa)	有效应力 σ_{ec} (Pa)	罗德角 θ	压子午线 σ_{ec}^c (Pa)	拉子午线 σ_{ec}^t (Pa)	极限有效应 力 $\sigma_{ec}(\theta)$ (Pa)
-0.181	-3.221E+05	2.125E+05	1.020E+00	3.187E+06	1.753E+06	3.149E+06
-0.186	-3.074E+05	2.082E+05	1.020E+00	3.176E+06	1.748E+06	3.139E+06
-0.191	-2.928E+05	2.038E+05	1.021E+00	3.166E+06	1.742E+06	3.130E+06
-0.196	-2.781E+05	1.995E+05	1.021E+00	3.156E+06	1.736E+06	3.120E+06
-0.201	-2.642E+05	1.953E+05	1.022E+00	3.146E+06	1.731E+06	3.111E+06
-0.206	-2.526E+05	1.915E+05	1.023E+00	3.138E+06	1.726E+06	3.105E+06
-0.211	-2.409E+05	1.878E+05	1.024E+00	3.130E+06	1.722E+06	3.098E+06
-0.216	-2.293E+05	1.841E+05	1.025E+00	3.122E+06	1.717E+06	3.091E+06
-0.221	-2.177E+05	1.804E+05	1.026E+00	3.113E+06	1.713E+06	3.085E+06
-0.226	-2.061E+05	1.767E+05	1.027E+00	3.105E+06	1.708E+06	3.078E+06
-0.231	-1.944E+05	1.729E+05	1.028E+00	3.097E+06	1.704E+06	3.072E+06
-0.236	-1.828E+05	1.692E+05	1.029E+00	3.089E+06	1.699E+06	3.065E+06
-0.241	-1.712E+05	1.655E+05	1.031E+00	3.081E+06	1.695E+06	3.059E+06
-0.246	-1.596E+05	1.618E+05	1.032E+00	3.072E+06	1.690E+06	3.053E+06
-0.251	-1.479E+05	1.580E+05	1.034E+00	3.064E+06	1.686E+06	3.046E+06
-0.256	-1.372E+05	1.546E+05	1.035E+00	3.057E+06	1.682E+06	3.041E+06
-0.261	-1.304E+05	1.521E+05	1.036E+00	3.052E+06	1.679E+06	3.037E+06
-0.266	-1.235E+05	1.497E+05	1.037E+00	3.047E+06	1.677E+06	3.033E+06
-0.271	-1.167E+05	1.473E+05	1.037E+00	3.042E+06	1.674E+06	3.029E+06
-0.276	-1.098E+05	1.448E+05	1.038E+00	3.037E+06	1.671E+06	3.026E+06
-0.281	-1.030E+05	1.424E+05	1.039E+00	3.033E+06	1.669E+06	3.022E+06
-0.286	-9.614E+04	1.400E+05	1.040E+00	3.028E+06	1.666E+06	3.019E+06
-0.291	-8.929E+04	1.375E+05	1.041E+00	3.023E+06	1.663E+06	3.015E+06

-0.296	-8.244E+04	1.351E+05	1.042E+00	3.018E+06	1.661E+06	3.012E+06
-0.302	-7.559E+04	1.327E+05	1.043E+00	3.013E+06	1.658E+06	3.008E+06
-0.307	-6.874E+04	1.302E+05	1.044E+00	3.009E+06	1.655E+06	3.005E+06
-0.312	-6.189E+04	1.278E+05	1.045E+00	3.004E+06	1.653E+06	3.001E+06
-0.317	-5.504E+04	1.254E+05	1.046E+00	2.999E+06	1.650E+06	2.998E+06
-0.322	-4.819E+04	1.230E+05	1.047E+00	2.994E+06	1.647E+06	2.994E+06
-0.327	-4.134E+04	1.205E+05	1.046E+00	2.989E+06	1.645E+06	2.987E+06
-0.332	-3.449E+04	1.181E+05	1.044E+00	2.984E+06	1.642E+06	2.981E+06
-0.337	-2.798E+04	1.160E+05	1.043E+00	2.980E+06	1.640E+06	2.974E+06
-0.342	-2.257E+04	1.150E+05	1.041E+00	2.976E+06	1.637E+06	2.968E+06
-0.347	-1.715E+04	1.141E+05	1.039E+00	2.972E+06	1.635E+06	2.961E+06
-0.352	-1.174E+04	1.131E+05	1.037E+00	2.968E+06	1.633E+06	2.955E+06
-0.357	-6.324E+03	1.121E+05	1.034E+00	2.965E+06	1.631E+06	2.948E+06
-0.362	-9.090E+02	1.111E+05	1.032E+00	2.961E+06	1.629E+06	2.942E+06
-0.367	4.505E+03	1.102E+05	1.030E+00	2.957E+06	1.627E+06	2.936E+06
-0.372	9.919E+03	1.092E+05	1.028E+00	2.953E+06	1.625E+06	2.929E+06
-0.377	1.533E+04	1.083E+05	1.026E+00	2.949E+06	1.623E+06	2.923E+06
-0.382	2.075E+04	1.073E+05	1.024E+00	2.946E+06	1.621E+06	2.916E+06
-0.387	2.616E+04	1.064E+05	1.022E+00	2.942E+06	1.619E+06	2.910E+06
-0.392	3.158E+04	1.055E+05	1.020E+00	2.938E+06	1.617E+06	2.903E+06
-0.397	3.699E+04	1.045E+05	1.018E+00	2.934E+06	1.614E+06	2.897E+06
-0.402	4.241E+04	1.036E+05	1.015E+00	2.930E+06	1.612E+06	2.890E+06
-0.407	4.782E+04	1.027E+05	1.013E+00	2.927E+06	1.610E+06	2.884E+06
-0.412	5.323E+04	1.018E+05	1.011E+00	2.923E+06	1.608E+06	2.878E+06
-0.417	5.865E+04	1.009E+05	1.009E+00	2.919E+06	1.606E+06	2.871E+06
-0.422	6.406E+04	1.000E+05	1.007E+00	2.915E+06	1.604E+06	2.865E+06
-0.427	6.921E+04	9.961E+04	1.004E+00	2.912E+06	1.602E+06	2.857E+06
-0.432	7.413E+04	9.960E+04	9.999E-01	2.908E+06	1.600E+06	2.849E+06
-0.437	7.905E+04	9.962E+04	9.960E-01	2.905E+06	1.598E+06	2.841E+06
-0.442	8.396E+04	9.965E+04	9.923E-01	2.901E+06	1.596E+06	2.833E+06
-0.447	8.888E+04	9.970E+04	9.886E-01	2.898E+06	1.594E+06	2.825E+06
-0.452	9.379E+04	9.977E+04	9.851E-01	2.894E+06	1.592E+06	2.817E+06
-0.457	9.871E+04	9.985E+04	9.816E-01	2.891E+06	1.591E+06	2.809E+06
-0.462	1.036E+05	9.995E+04	9.783E-01	2.887E+06	1.589E+06	2.802E+06
-0.467	1.085E+05	1.001E+05	9.751E-01	2.884E+06	1.587E+06	2.795E+06
-0.472	1.135E+05	1.002E+05	9.721E-01	2.880E+06	1.585E+06	2.787E+06
-0.477	1.184E+05	1.004E+05	9.691E-01	2.877E+06	1.583E+06	2.780E+06

-0.482	1.233E+05	1.005E+05	9.662E-01	2.874E+06	1.581E+06	2.774E+06
-0.487	1.282E+05	1.007E+05	9.635E-01	2.870E+06	1.579E+06	2.767E+06
-0.492	1.331E+05	1.009E+05	9.609E-01	2.867E+06	1.577E+06	2.760E+06
-0.497	1.380E+05	1.011E+05	9.584E-01	2.863E+06	1.575E+06	2.754E+06
-0.503	1.429E+05	1.014E+05	9.561E-01	2.860E+06	1.573E+06	2.748E+06
-0.508	1.479E+05	1.021E+05	9.527E-01	2.856E+06	1.571E+06	2.740E+06
-0.513	1.529E+05	1.033E+05	9.486E-01	2.853E+06	1.570E+06	2.732E+06
-0.518	1.579E+05	1.045E+05	9.448E-01	2.849E+06	1.568E+06	2.724E+06
-0.523	1.629E+05	1.058E+05	9.414E-01	2.846E+06	1.566E+06	2.716E+06
-0.528	1.679E+05	1.071E+05	9.381E-01	2.842E+06	1.564E+06	2.709E+06
-0.533	1.729E+05	1.084E+05	9.352E-01	2.839E+06	1.562E+06	2.702E+06
-0.538	1.779E+05	1.097E+05	9.324E-01	2.835E+06	1.560E+06	2.695E+06
-0.543	182930	1.110E+05	9.299E-01	2.832E+06	1.558E+06	2.689E+06
-0.548	187939	1.124E+05	9.276E-01	2.828E+06	1.556E+06	2.683E+06
-0.553	192937	1.138E+05	9.256E-01	2.825E+06	1.554E+06	2.677E+06
-0.558	197935	1.153E+05	9.237E-01	2.821E+06	1.552E+06	2.671E+06

在表 H.2.4.2-2 的基础上，确定计算点位的有效应力之比，按照本标准表 5.5.4 选取水泥稳定碎石疲劳归一化方程参数 $\gamma = -10$ ，得到水泥稳定碎石疲劳归一化模型 $N_f = (\Delta)^\gamma = \left(\frac{\sigma_{ec}}{\sigma_{ec}(\theta)} \right)^{-10}$ ，进而反算路面结构疲劳寿命，同时按照本标准表 3.0.4 的设计年限要求，计算水泥稳定碎石 60 年的设计交通量，计算结果见表 H.2.4.2-3。

表 H.2.4.2-3 路面结构设计点位疲劳开裂寿命验算结果（水泥稳定碎石层 F_i ）

厚度	有效应力之比 $\Delta = \frac{\sigma_{ec}}{\sigma_{ec}(\theta)}$	疲劳开裂寿命 N_f	设计交通量
-0.181	0.067492158	1.4568E+12	2.881E+10
-0.186	0.06630948	1.7385E+12	2.881E+10
-0.191	0.065119672	2.08358E+12	2.881E+10
-0.196	0.063926034	2.507E+12	2.881E+10
-0.201	0.062759548	3.01393E+12	2.881E+10
-0.206	0.061694243	3.57673E+12	2.881E+10
-0.211	0.060626815	4.25877E+12	2.881E+10
-0.216	0.059551122	5.09369E+12	2.881E+10
-0.221	0.058472649	6.11511E+12	2.881E+10

-0.226	0.057388709	7.37339E+12	2.881E+10
-0.231	0.056296119	8.93609E+12	2.881E+10
-0.236	0.055201023	1.08758E+13	2.881E+10
-0.241	0.054097177	1.33102E+13	2.881E+10
-0.246	0.052990782	1.63655E+13	2.881E+10
-0.251	0.051878689	2.02321E+13	2.881E+10
-0.256	0.05083328	2.47999E+13	2.881E+10
-0.261	0.050092404	2.87219E+13	2.881E+10
-0.266	0.049352513	3.33303E+13	2.881E+10
-0.271	0.048607372	3.8807E+13	2.881E+10
-0.276	0.0478629	4.52837E+13	2.881E+10
-0.281	0.047113242	5.30276E+13	2.881E+10
-0.286	0.046364749	6.22376E+13	2.881E+10
-0.291	0.045613929	7.32752E+13	2.881E+10
-0.296	0.044857566	8.66114E+13	2.881E+10
-0.302	0.044102414	1.02638E+14	2.881E+10
-0.307	0.043345163	1.22047E+14	2.881E+10
-0.312	0.042585553	1.4565E+14	2.881E+10
-0.317	0.041820341	1.74605E+14	2.881E+10
-0.322	0.041074036	2.09054E+14	2.881E+10
-0.327	0.040350565	2.4971E+14	2.881E+10
-0.332	0.039624896	2.99399E+14	2.881E+10
-0.337	0.039010355	3.50052E+14	2.881E+10
-0.342	0.038761669	3.7317E+14	2.881E+10
-0.347	0.038513753	3.979E+14	2.881E+10
-0.352	0.038266887	4.24327E+14	2.881E+10
-0.357	0.038020435	4.52649E+14	2.881E+10
-0.362	0.037775061	4.82926E+14	2.881E+10
-0.367	0.037531116	5.15249E+14	2.881E+10
-0.372	0.037287254	5.49956E+14	2.881E+10
-0.377	0.037045176	5.86969E+14	2.881E+10
-0.382	0.036804155	6.26561E+14	2.881E+10
-0.387	0.036563902	6.6897E+14	2.881E+10
-0.392	0.036324764	7.14338E+14	2.881E+10
-0.397	0.036087412	7.62737E+14	2.881E+10
-0.402	0.035850826	8.14592E+14	2.881E+10
-0.407	0.03561572	8.69991E+14	2.881E+10

-0.412	0.03538203	9.2919E+14	2.881E+10
-0.417	0.035149841	9.92426E+14	2.881E+10
-0.422	0.034919079	1.06E+15	2.881E+10
-0.427	0.034860623	1.07791E+15	2.881E+10
-0.432	0.034961423	1.04723E+15	2.881E+10
-0.437	0.035067252	1.01605E+15	2.881E+10
-0.442	0.035178708	9.84313E+14	2.881E+10
-0.447	0.035294481	9.52498E+14	2.881E+10
-0.452	0.035415142	9.20539E+14	2.881E+10
-0.457	0.03554138	8.8836E+14	2.881E+10
-0.462	0.035671787	8.56413E+14	2.881E+10
-0.467	0.035807335	8.2454E+14	2.881E+10
-0.472	0.035947675	7.9291E+14	2.881E+10
-0.477	0.036093432	7.61465E+14	2.881E+10
-0.482	0.03624355	7.30507E+14	2.881E+10
-0.487	0.036398341	7.00029E+14	2.881E+10
-0.492	0.03655814	6.70025E+14	2.881E+10
-0.497	0.036722545	6.40626E+14	2.881E+10
-0.503	0.036891537	6.11877E+14	2.881E+10
-0.508	0.037272573	5.52126E+14	2.881E+10
-0.513	0.037821342	4.77049E+14	2.881E+10
-0.518	0.038379291	4.12062E+14	2.881E+10
-0.523	0.038946297	3.55853E+14	2.881E+10
-0.528	0.03952228	3.07264E+14	2.881E+10
-0.533	0.04010497	2.6543E+14	2.881E+10
-0.538	0.040699761	2.29094E+14	2.881E+10
-0.543	0.041298263	1.97977E+14	2.881E+10
-0.548	0.041908435	1.70969E+14	2.881E+10
-0.553	0.042522523	1.47823E+14	2.881E+10
-0.558	0.043143486	1.27873E+14	2.881E+10

从上述计算结果来看，水泥稳定碎石基层疲劳寿命均满足设计年限要求。

JTG D50-2017 计算结果：

设计层厚度 $H(5)=200$ mm

季节性冻土地区调整系数 $K_A=0.8$

温度调整系数 $K_{T2}=1.588$

现场综合修正系数 $K_C=-1.299$

第 5 层层底拉应力 $\sigma=0.189$ MPa

第 5 层无机结合料稳定层疲劳开裂寿命 $NF2=2.238532E+09$ 轴次

设计使用年限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数 $NZB2=1.39259E+09$ 轴次

第 5 层无机结合料稳定层疲劳开裂验算已满足设计要求。

H.2.4.3 沥青混合料层永久变形量

按照 JTG D50-2017 计算方法进行计算，本算例结果由计算软件 HPDS2017 得到。

路面结构的层数:6

设计轴载: 100 kN

路面设计层层位: 5

设计层起始厚度: 280 (mm)

表 H.2.4.3-1 路面结构及材料参数 (JTG D50-2017 规定)

层位	结构层材料名称	厚度 (mm)	模量 (MPa)	泊松比	水泥稳定碎石弯拉强度 (MPa)	永久变形量(mm)
1	细粒式沥青混凝土	40	11000	0.25		1.778
2	中粒式沥青混凝土	60	10000	0.25		2
3	粗粒式沥青混凝土	80	9000	0.25		3
4	水泥稳定碎石	200	11500	0.25	1.75	
5	水泥稳定碎石	200	11500	0.25	1.75	
6	级配碎石	400	400	0.35		
7	新建路基	80		0.4		

沥青混合料层永久变形等效温度 $TPEF=26.7^{\circ}\text{C}$

通车至首次针对车辙维修的期限内 (15 年) 设计车道上的当量设计轴载累计作用次数 $NZB3=1.856464E+07$ 轴次。

沥青混合料层永久变形验算分层数 $N=6$

第 1 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(1)=1.53$ mm

第 2 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(2)=2.73$ mm

第 3 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(3)=3.03$ mm

第 4 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(4)=2.2$ mm

第 5 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(5) = 1.34 \text{ mm}$

第 6 分层沥青混合料永久变形量 $RAI(6) = 2.56 \text{ mm}$

沥青混合料层永久变形量 $RA = 13.39 \text{ mm}$

沥青混合料层容许永久变形量 $RAR = 15 \text{ mm}$

沥青混合料层永久变形量满足 JTG D50-2017 规范要求。

第 1 层沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求为 3995 次/mm；

第 2 层沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求为 3357 次/mm；

第 3 层沥青混合料车辙试验动稳定度技术要求为 1842 次/mm。

H.2.4.4 低温开裂指数

路面所在地区低温设计温度 $TSJ = -10 \text{ }^\circ\text{C}$

表面层沥青弯曲梁流变试验蠕变劲度 $ST = 260 \text{ MPa}$

沥青结合料类材料层厚度 $HA = 180 \text{ mm}$

路基类型参数 $BLJ = 2$

沥青面层低温开裂指数 $CI = 0.1$ 条

沥青面层容许低温开裂指数 $CIR = 3$ 条

沥青面层低温开裂指数值满足 JTG D50-2017 规范要求。

H.2.4.5 路基顶面竖向压应变

当验算路基顶面竖向压应变时:设计使用年限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数为 $3.262518\text{E}+07$ 。

对于半刚性基层沥青路面结构,无需计算路基顶面竖向压应变指标。

可计算设计路面结构的验收弯沉值:

干湿循环或冻融循环条件下路基土模量折减系数 $KAT = 0.9$

路基顶面验收弯沉值 $LG = 210.1 (0.01\text{mm})$

路表验收弯沉值 $LA = 18.4 (0.01\text{mm})$

H.2.4.6 结论

综合本标准和 JTG D50-2017 规定,拟定结构满足寿命逐层递增式耐久性沥青路面结构要求。