

7 改建设计

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于沥青路面结构补强设计。

7.1.2 改建设计应充分调查和分段评估既有路面状况，分析路面损坏原因，提出针对性改建对策，经技术经济分析后，结合工程经验确定适应预期交通荷载等级和使用性能要求的改建设计方案。

7.1.3 确定改建设计方案时，应充分利用既有路面结构性能，减少废弃材料，并积极、稳妥地再生利用既有路面材料。

7.1.4 应考虑施工期交通组织设计和临时安全设施设计。

7.1.5 改建设计应采用动态设计理念，工程实施阶段应逐段调查分析现场路况，动态调整改建方案。

7.2 既有路面调查与分析

7.2.1 既有路面调查与分析应包括下列主要内容：

- 1 收集既有路面及其排水设施的设计、施工及历史养护维修情况等技术资料。
- 2 调查分析交通量、轴载组成和增长率等交通荷载参数。
- 3 调查路面破损状况，包括路面病害类型、严重程度、范围和数量等。
- 4 采用落锤式动态弯沉仪或其他弯沉仪检测评价既有路面结构承载能力。
- 5 采用钻芯、探坑取样、路面雷达、切割等方式，调查分析既有路面厚度、层间结合及病害程度情况，并取样进行室内试验，测定试件模量、强度等，分析路面材料组成与退化情况。
- 6 对因路基问题导致路面损坏的路段，取样调查路基土质类型、含水率和 CBR 值等，分析路基稳定性和承载力等。
- 7 调查沿线气候条件、地下水位及路基路面排水状况。
- 8 调查沿线跨线桥、隧道净空要求及其他影响路面改建设计的因素。

7.2.2 既有路面损坏状况的评定应符合现行《公路技术状况评定标准》(JTG H20)和《公路养护技术规范》(JTG H10)的有关规定，可结合路面损坏特点采用路面横向裂缝间距、纵向裂缝率、网裂面积率和修补面积率等指标进行补充评价。

7.2.3 应根据既有路面调查结果综合分析病害原因，判断路面病害的层位、破坏程度、发展趋势及既有路面的可利用程度。

7.3 改建方案

7.3.1 应根据不同路段路面状况和损坏程度，对既有路面采取相应的处理方案。

7.3.2 既有路面处理可采用局部病害处治、整体性处理的方式或局部病害处治与整体性处理相结合的方式，并应符合下列规定：

1 既有路面破损不严重且结构性能较好的路段可参照现行《公路沥青路面养护技术规范》(JTJ 073.2)对局部病害处治后加铺。

2 既有路面破损严重或结构性能不足的路段，宜采用整体性处理方式。处理深度和范围应根据路面破损程度、层位和处理工艺确定。

7.3.3 改建方案应充分利用既有路面结构和材料，可视具体情况选择经局部病害处治后直接加铺一层或多层改建方案、将既有路面铣刨至某一结构层或将既有路面就地再生后再加铺一层或多层改建方案。

7.3.4 既有路面存在较多裂缝时，应采取减缓反射裂缝的措施。

7.3.5 既有路面出现因内部排水不良引起的水损坏时，应改善或重置路面防排水系统。加铺层与既有路面间应采取设置黏层或封层等层间结合措施。

7.3.6 加铺层材料组成和技术要求应符合本规范第5章的规定。再生材料技术要求应符合现行《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41)的有关规定。

7.4 改建路面结构验算

7.4.1 设计使用年限内预期的交通荷载参数应按本规范附录A进行调查和分析，并按本规范第3.0.4条确定交通荷载等级。

7.4.2 加铺层以及经处治后的既有路面结构在设计使用年限内的使用性能，应符合

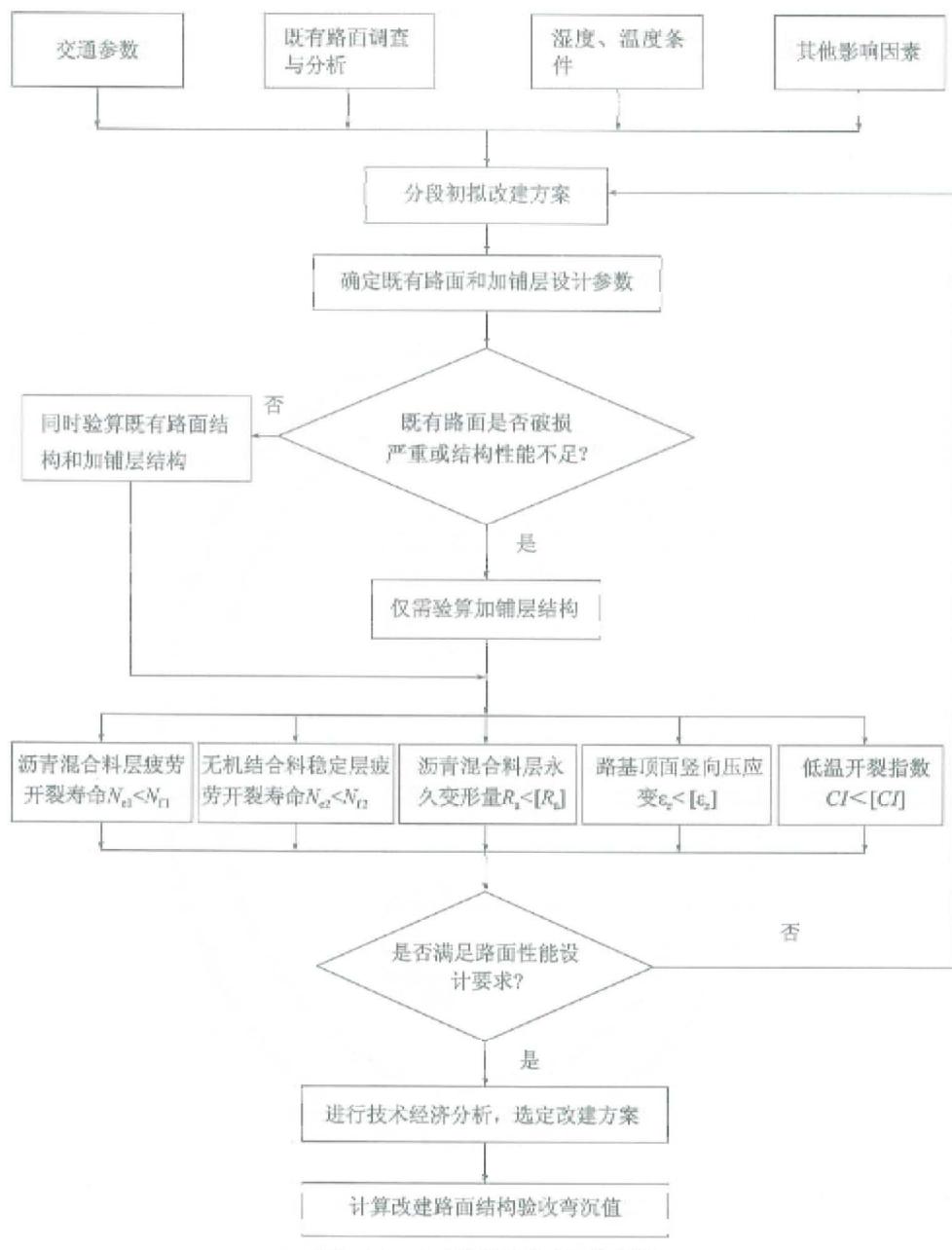


图 7.4.6 改建路面结构验算流程图

5 收集工程所在地区气温资料，按本规范附录 G 确定各设计指标相应的温度调整系数或等效温度。

6 采用多层弹性体系理论程序计算各设计指标的力学响应量。

7 按本规范附录 B 进行路面结构验算，验算结果应符合本规范第 3.0.6 条的规定，不符合时，调整路面改建方案重新验算，直至符合为止。

8 对通过结构验算的路面结构进行技术经济分析，选定路面改建方案。

9 按本规范附录 B.7 计算改建路面结构的路表验收弯沉值。

8 桥面铺装设计

8.1 一般规定

8.1.1 桥面铺装设计可包括桥面板处理、防排水、铺装结构层、路缘带和伸缩缝接触部位的填封设计等，设计时应综合考虑桥梁类型、公路等级、交通荷载等级和气候条件等因素。

8.1.2 桥面铺装层结构宜与公路主线路面结构相协调，钢桥面、大桥和特大桥的水泥混凝土桥面的沥青混合料铺装宜进行专项设计。

8.1.3 桥面防水体系应具有足够的耐久性。

8.2 水泥混凝土桥面铺装

8.2.1 水泥混凝土桥面板宜进行铣刨或抛丸打毛处理，处理后桥面板的构造深度宜为0.4~0.8mm。

8.2.2 设置水泥混凝土调平层的桥面，调平层厚度不宜小于80mm，且应按要求设置钢筋网。调平层混凝土强度等级应与梁体一致，并与桥面板结合紧密。

8.2.3 水泥混凝土桥面防水层材料应具有足够的黏结强度、防水能力、抗施工损伤能力和耐久性，可采用热沥青、涂膜等。

8.2.4 热沥青防水层宜采用橡胶沥青或SBS改性沥青，沥青膜厚度宜为1.5~2.0mm，应撒布覆盖率为60%~70%的单粒径碎石。

8.2.5 高速公路、一级公路水泥混凝土桥面沥青混合料铺装层厚度不宜小于70mm，宜采用两层或两层以上的结构，沥青混合料铺装上层厚度不宜小于30mm。二级及二级以下公路水泥混凝土桥面沥青混合料铺装层厚度不宜小于50mm。

8.2.6 特大桥桥面铺装宜设置砂粒式沥青混合料层。砂粒式沥青混合料层应具有足

够的高温稳定性、密水性和抗施工损伤性能，可选用改性沥青胶砂、浇筑式沥青混凝土等。

8.2.7 桥面沥青混合料铺装层应具有较小的空隙率，并具有良好的高温稳定性和抗滑性能，宜选用连续级配沥青混合料或沥青玛蹄脂碎石等。

8.2.8 路缘带、护栏和伸缩缝与沥青混合料铺装层的接触部位宜采用热沥青、贴缝条或封缝料进行封缝防水处理。

8.2.9 桥面铺装边缘带可在沥青混合料铺装下层设置纵向盲沟，宽度宜为 100 ~ 200mm，可采用开级配沥青混合料或单粒径碎石填充。盲沟应与桥梁泄水孔相连。

8.3 钢桥面铺装

8.3.1 钢桥面应进行抛丸处理，除锈等级应不低于 Sa2.5 级，并应及时涂刷防锈层或黏结层。

8.3.2 钢桥面防水材料应与铺装层材料类型相匹配。

8.3.3 钢桥面铺装宜采用浇筑式沥青混凝土、环氧沥青混凝土、连续级配沥青混合料、沥青玛蹄脂碎石或多种混合料组合。

附录 A 交通荷载参数分析

A.1 车型分类

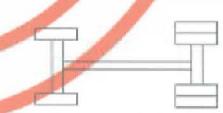
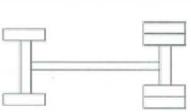
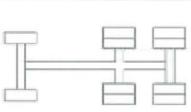
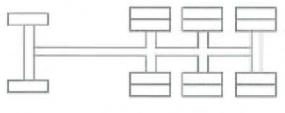
A.1.1 车辆轴型应根据表 A.1.1 规定按轮组和轴组类型分为 7 类。

表 A.1.1 轴型分类

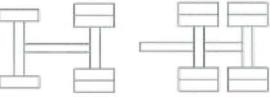
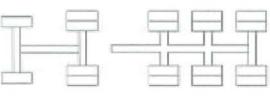
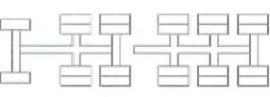
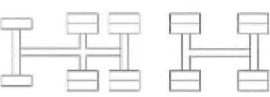
轴型编号	轴型说明	轴型编号	轴型说明
1	单轴（每侧单轮胎）	5	双联轴（每侧双轮胎）
2	单轴（每侧双轮胎）	6	三联轴（每侧单轮胎）
3	双联轴（每侧单轮胎）	7	三联轴（每侧双轮胎）
4	双联轴（每侧各一单轮胎、双轮胎）		

A.1.2 车辆类型应按表 A.1.2 所列轴型组合分为 11 类。

表 A.1.2 车辆类型分类

车型编号	说 明	主要车型及图示	其他车型
1类	2 轴 4 轮车辆	11 型车 	
2类	2 轴 6 轮及以上客车	12 型客车 	15 型客车
3类	2 轴 6 轮整体式货车	12 型货车 	
4类	3 轴整体式货车 (非双前轴)	15 型 	
5类	4 轴及以上整体式货车 (非双前轴)	17 型 	

续表 A. 1. 2

车型编号	说 明	主要车型及图示		其他车型
6类	双前轴整体式货车	112型 115型		117型
7类	4轴及以下半挂货车 (非双前轴)	125型		122型
8类	5轴半挂货车 (非双前轴)	127型 155型		
9类	6轴及以上半挂货车 (非双前轴)	157型		
10类	双前轴半挂式货车	1127型		1122型 1125型 1155型 1157型
11类	全挂货车	1522型 1222型		

A. 2 交通数据调查

A. 2. 1 交通数据调查应包括交通量及增长率、方向系数、车道系数、车辆类型组成、轴组组成和轴重等。

A. 2. 2 公路初期交通量和其他参数可参照可行性研究报告等有关交通量预测资料，结合当地交通观测站的观测和统计资料，或通过实地设立站点进行观测和统计。

A. 2. 3 交通量的年平均增长率可依据公路等级和功能以及地区经济和交通发展情况等，通过调查分析确定。

A. 2. 4 方向系数宜根据不同方向上实测交通量数据确定，无实测数据时可在 0.5 ~ 0.6 范围内选取。

A. 2. 5 车道系数可按下列三个水平确定，改进建议应采用水平一，新建路面设计可

采用水平二或水平三：

- 1 水平一，根据现场交通量观测资料统计设计方向不同车道上车辆的数量，确定车道系数。
- 2 水平二，采用当地的经验值。
- 3 水平三，采用表 A.2.5 推荐值。

表 A.2.5 车道系数

单向车道数	1	2	3	≥ 4
高速公路	—	0.70 ~ 0.85	0.45 ~ 0.60	0.40 ~ 0.50
其他等级公路	1.00	0.50 ~ 0.75	0.50 ~ 0.75	—

注：交通受非机动车和行人影响严重时取低限，反之取高值。

A.2.6 车辆类型分布系数可按下列三个水平确定，改建设计应采用水平一，新建路面设计可采用水平二或水平三：

- 1 水平一，根据交通观测资料分析 2 类 ~ 11 类车型所占的百分比，得到车辆类型分布系数。
- 2 水平二，根据交通历史数据或经验数据按表 A.2.6-1 确定公路 TTC 分类，采用该 TTC 分类车辆类型分布系数当地经验值。
- 3 水平三，根据交通历史数据或经验数据按表 A.2.6-1 确定公路 TTC 分类，采用表 A.2.6-2 规定车辆类型分布系数。

表 A.2.6-1 公路 TTC 分类标准 (%)

TTC 分类	整体式货车比例	半挂式货车比例
TTC1	<40	>50
TTC2	<40	<50
TTC3	40 ~ 70	>20
TTC4	40 ~ 70	<20
TTC5	>70	—

注：表中整体式货车为表 A.1.2 中 3 类 ~ 6 类车，半挂式货车为表 A.1.2 中 7 类 ~ 10 类车。

表 A.2.6-2 不同 TTC 分类车辆类型分布系数 (%)

车辆类型	2类	3类	4类	5类	6类	7类	8类	9类	10类	11类
TTC1	6.4	15.3	1.4	0.0	11.9	3.1	16.3	20.4	25.2	0.0
TTC2	22.0	23.3	2.7	0.0	8.3	7.5	17.1	8.5	10.6	0.0
TTC3	17.8	33.1	3.4	0.0	12.5	4.4	9.1	10.6	8.5	0.7
TTC4	28.9	43.9	5.5	0.0	9.4	2.0	4.6	3.4	2.3	0.1
TTC5	9.9	42.3	14.8	0.0	22.7	2.0	2.3	3.2	2.5	0.2

A.3 车辆当量设计轴载换算

A.3.1 各类车辆当量设计轴载换算系数可按下列三个水平确定，高速公路和一级公路的改进建设应采用水平一，其他情况可采用水平二或水平三：

1 水平一，采用称重设备连续采集设计车道上车辆类型、轴型组成和轴重数据，按下列步骤分析各类车辆当量换算系数：

1) 分别统计2类~11类车辆单轴单胎、单轴双胎、双联轴和三联轴的数量，除以各类车辆总量，按式(A.3.1-1)计算各类车辆中不同轴型平均轴数。

$$NAPT_{mi} = \frac{NA_{mi}}{NT_m} \quad (\text{A.3.1-1})$$

式中： $NAPT_{mi}$ —— m 类车辆中 i 种轴型的平均轴数；

NA_{mi} —— m 类车辆中 i 种轴型总数；

NT_m —— m 类车辆总数；

i ——分别为单轴单胎、单轴双胎、双联轴和三联轴；

m ——表A.1.2所列2类~11类车。

2) 按式(A.3.1-2)计算2类~11类车辆不同轴型在不同轴重区间所占的百分比，得到不同轴型的轴重分布系数，即轴载谱。确定轴载谱时，单轴单胎、单轴双胎、双联轴和三联轴应分别间隔2.5kN、4.5kN、9.0kN和13.5kN划分轴重区间。

$$ALDF_{mij} = \frac{ND_{mij}}{NA_{mi}} \quad (\text{A.3.1-2})$$

式中： $ALDF_{mij}$ —— m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间的轴重分布系数；

ND_{mij} —— m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间的数量；

NA_{mi} —— m 类车辆中 i 种轴型的数量；

其他符号意义同式(A.3.1-1)。

3) 按式(A.3.1-3)计算2类~11类车辆各种轴型在不同轴重区间的当量设计轴载换算系数，计算时取各轴重区间中点值作为该轴重区间代表轴重。按式(A.3.1-4)计算各类车辆当量设计轴载换算系数：

$$EALF_{mij} = c_1 c_2 \left(\frac{P_{mij}}{P_s} \right)^b \quad (\text{A.3.1-3})$$

式中： P_s ——设计轴载(kN)；

P_{mij} —— m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间的单轴轴载(kN)，对双联轴和三联轴，为平均分配到每根单轴的轴载；

b ——换算指数。分析沥青混合料层疲劳和沥青混合料层永久变形时， $b=4$ ；分析路基永久变形时， $b=5$ ；分析无机结合料稳定层疲劳时， $b=13$ ；

c_1 ——轴组系数，前后轴间距大于3m时，分别按单个轴计算；轴间距小于3m时，按表A.3.1-1取值；

c_2 ——轮组系数，双轮组为1.0，单轮时取4.5。

表 A.3.1-1 轴组系数取值

设计指标	轮—轴型	c_1 取值
沥青混合料层层底拉应变、 沥青混合料层永久变形量	双联轴	2.1
	三联轴	3.2
路基顶面竖向压应变	双联轴	4.2
	三联轴	8.7
无机结合料稳定层层底拉应力	双联轴	2.6
	三联轴	3.8

$$EALF_m = \sum_i (NAPT_{mi} \sum_j (EALF_{mij} \times ALDF_{mij})) \quad (A.3.1-4)$$

式中： $EALF_m$ —— m 类车辆的当量设计轴载换算系数；

$NAPT_{mi}$ —— m 类车辆中 i 种轴型的平均轴数；

$ALDF_{mij}$ —— m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间的轴重分布系数；

$EALF_{mij}$ —— m 类车辆中 i 种轴型在 j 级轴重区间当量设计轴载换算系数，根据式(A.3.1-3)计算确定。

2 水平二和水平三，按式(A.3.1-5)确定各类车辆的当量设计轴载换算系数。式(A.3.1-5)中非满载车和满载车的比例和当量设计轴载换算系数，水平二时取当地经验值，水平三时取表A.3.1-2和表A.3.1-3所列全国经验值。

$$EALF_m = EALF_{ml} \times PER_{ml} + EALF_{mh} \times PER_{mh} \quad (A.3.1-5)$$

式中： $EALF_{ml}$ —— m 类车辆中非满载车的当量设计轴载换算系数；

$EALF_{mh}$ —— m 类车辆中满载车的当量设计轴载换算系数；

PER_{ml} —— m 类车辆中非满载车所占的百分比；

PER_{mh} —— m 类车辆中满载车所占的百分比。

表 A.3.1-2 2类~11类车辆非满载车与满载车比例

车 型	非满载比例	满 载 比 例
2类	0.80~0.90	0.10~0.20
3类	0.85~0.95	0.05~0.15
4类	0.60~0.70	0.30~0.40
5类	0.70~0.80	0.20~0.30
6类	0.50~0.60	0.40~0.50
7类	0.65~0.75	0.25~0.35

续表 A.3.1-2

车 型	非满载比例	满 载 比 例
8类	0.40~0.50	0.50~0.60
9类	0.55~0.65	0.35~0.45
10类	0.50~0.60	0.40~0.50
11类	0.60~0.70	0.30~0.40

表 A.3.1-3 2类~11类车辆当量设计轴载换算系数

车型	沥青混合料层层底拉应变、沥青混合料层永久变形量		无机结合料稳定层 层底拉应力		路基顶面竖向压应变	
	非满载车	满载车	非满载车	满载车	非满载车	满载车
2类	0.8	2.8	0.5	35.5	0.6	2.9
3类	0.4	4.1	1.3	314.2	0.4	5.6
4类	0.7	4.2	0.3	137.6	0.9	8.8
5类	0.6	6.3	0.6	72.9	0.7	12.4
6类	1.3	7.9	10.2	1505.7	1.6	17.1
7类	1.4	6.0	7.8	553.0	1.9	11.7
8类	1.4	6.7	16.4	713.5	1.8	12.5
9类	1.5	5.1	0.7	204.3	2.8	12.5
10类	2.4	7.0	37.8	426.8	3.7	13.3
11类	1.5	12.1	2.5	985.4	1.6	20.8

A.4 当量设计轴载累计作用次数

A.4.1 根据本规范第A.3节确定的车辆当量设计轴载换算系数,按式(A.4.1)确定初始年设计车道日平均当量轴次 N_1 。

$$N_1 = AADTT \times DDF \times LDF \times \sum_{m=2}^{11} (VCDF_m \times EALF_m) \quad (A.4.1)$$

式中: $AADTT$ —2轴6轮及以上车辆的双向年平均日交通量(辆/d);

DDF —方向系数;

LDF —车道系数;

m —车辆类型编号;

$VCDF_m$ — m 类车辆类型分布系数;

$EALF_m$ — m 类车辆的当量设计轴载换算系数。

A.4.2 应根据初始年设计车道日平均当量轴次 N_1 、设计使用年限等,按式(A.4.2)计算设计车道上的当量设计轴载累计作用次数 N_e 。

$$N_e = \frac{[(1 + \gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} N_1 \quad (A. 4. 2)$$

式中： N_e ——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（次）；

t ——设计使用年限（年）；

γ ——设计使用年限内交通量的年平均增长率；

N_1 ——初始年设计车道日平均当量轴次（次/d）。

附录 B 路面结构验算方法

B.1 沥青混合料层疲劳开裂验算

B.1.1 沥青混合料层的疲劳开裂寿命应根据路面结构分析得到的沥青混合料层层底拉应变, 按式 (B.1.1-1) 计算。

$$N_n = 6.32 \times 10^{15.96 - 0.292} k_a k_b k_{Tl} \left(\frac{1}{\varepsilon_a} \right)^{3.97} \left(\frac{1}{E_a} \right)^{1.58} (VFA)^{2.72} \quad (\text{B.1.1-1})$$

式中:

N_n ——沥青混合料层疲劳开裂寿命 (轴次);

β ——目标可靠指标, 根据公路等级按表 3.0.1 取值;

k_a ——季节性冻土地区调整系数, 按表 B.1.1 采用内插法确定;

k_b ——疲劳加载模式系数, 按式 (B.1.1-2) 计算;

$$k_b = \left[\frac{1 + 0.3 E_a^{0.43} (VFA)^{-0.85} e^{0.024 h_a - 5.41}}{1 + e^{0.024 h_a - 5.41}} \right]^{3.33} \quad (\text{B.1.1-2})$$

E_a ——沥青混合料 20℃时的动态压缩模量 (MPa);

VFA ——沥青混合料的沥青饱和度 (%), 根据混合料设计结果或按现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40) 的有关规定确定;

h_a ——沥青混合料层厚度 (mm);

k_{Tl} ——温度调整系数, 按本规范附录 G 确定;

ε_a ——沥青混合料层层底拉应变 (10^{-6}); 根据弹性层状体系理论, 按本规范第 6.2.2 条的规定选取计算点, 按式 (B.1.1-3) 计算:

$$\varepsilon_a = p \bar{\varepsilon}_a \quad (\text{B.1.1-3})$$

$$\bar{\varepsilon}_a = f \left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_{n-1}}{\delta}; \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{E_0}{E_{n-1}} \right)$$

$\bar{\varepsilon}_a$ ——理论拉应变系数;

p, δ ——标准轴载的轮胎接地压强 (MPa) 和当量圆半径 (mm);

E_0 ——路基顶面回弹模量 (MPa);

h_1, h_2, \dots, h_{n-1} ——各结构层厚度 (mm);

E_1, E_2, \dots, E_{n-1} ——各结构层模量 (MPa)。

表 B. 1.1 季节性冻土地区调整系数 k_a

冻区	重冻区	中冻区	轻冻区	其他地区
冻结指数 F (°C · d)	≥ 2000	$2000 \sim 800$	$800 \sim 50$	≤ 50
k_a	$0.60 \sim 0.70$	$0.70 \sim 0.80$	$0.80 \sim 1.00$	1.00

B. 1.2 沥青混合料层的疲劳开裂寿命应大于设计使用年限内设计车道的当量设计轴载累计作用次数。否则，应调整路面结构方案，重新验算，直至满足要求。

B. 2 无机结合料稳定层疲劳开裂验算

B. 2.1 无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命应根据路面结构分析得到的各无机结合料稳定层层底拉应力，按式 (B. 2.1-1) 计算。

$$N_{f2} = k_a k_{T2}^{-1} 10^{a - b \frac{\sigma_1}{R_s} + k_c - 0.57\beta} \quad (\text{B. 2. 1-1})$$

式中： N_{f2} ——无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命 (轴次)；

k_a ——季节性冻土地区调整系数，按表 B. 1.1 确定；

k_{T2} ——温度调整系数，根据本规范附录 G 确定；

R_s ——无机结合料稳定类材料的弯拉强度 (MPa)；

a, b ——疲劳试验回归参数，按表 B. 2.1-1 确定；

k_c ——现场综合修正系数，按式 (B. 2. 1-2) 确定；

$$k_c = c_1 e^{c_2(h_a + h_b)} + c_3 \quad (\text{B. 2. 1-2})$$

c_1, c_2, c_3 ——参数，按表 B. 2.1-2 取值；

h_a, h_b ——分别为沥青混合料层和计算点以上无机结合料稳定层厚度；

β ——目标可靠指标，根据公路等级按表 3.0.1 取值；

σ_1 ——无机结合料稳定层的层底拉应力 (MPa)，根据弹性层状体系理论，按本规范第 6.2.2 条的规定选取计算点，按式 (B. 2. 1-3) 计算：

$$\sigma_1 = p \bar{\sigma}_1 \quad (\text{B. 2. 1-3})$$

$$\bar{\sigma}_1 = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_{n-1}}{\delta}; \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{E_0}{E_{n-1}}\right)$$

$\bar{\sigma}_1$ ——理论拉应力系数；

其他符号意义同式 (B. 1.1-3)。

表 B. 2. 1-1 无机结合料稳定层疲劳破坏模型参数

材料类型	a	b
无机结合料稳定粒料	13.24	12.52
无机结合料稳定土	12.18	12.79

表 B. 2. 1-2 现场综合修正系数 k_c 相关参数

材料类型	新建路面结构层或改建工程既有路面结构层		改建工程加铺层	
	无机结合料稳定粒料	无机结合料稳定土	无机结合料稳定粒料	无机结合料稳定土
c_1	14.0	35.0	18.5	21.0
c_2	-0.0076	-0.0156	-0.01	-0.0125
c_3	-1.47	-0.83	-1.32	-0.82

B. 2. 2 无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命应大于设计使用年限内设计车道的当量设计轴载累计作用次数。否则，应调整路面结构组合或层厚，重新验算，直至满足要求。

B. 3 沥青混合料层永久变形量验算

B. 3. 1 应按下列要求对各沥青混合料层进行分层，分别计算各分层的永久变形量：

- 1 表面层，采用 10~20mm 为一分层。
- 2 第二层沥青混合料层，每一分层厚度应不大于 25mm。
- 3 第三层沥青混合料层，每一分层厚度应不大于 100mm。
- 4 第四层及其以下沥青混合料层，作为一个分层。

B. 3. 2 根据标准条件下的车辙试验，得到各层沥青混合料的车辙试验永久变形量，按式（B. 3. 2-1）计算各分层的永久变形量和沥青混合料层总的永久变形量。

$$R_a = \sum_{i=1}^n R_{ai} \quad (\text{B. 3. 2-1})$$

$$R_{ai} = 2.31 \times 10^{-8} k_{Ri} T_{pef}^{2.93} p_i^{1.80} N_{e3}^{0.48} (h_i/h_0) R_0$$

式中： R_a ——沥青混合料层永久变形量（mm）；

R_{ai} ——第 i 分层永久变形量（mm）；

n ——分层数；

T_{pef} ——沥青混合料层永久变形等效温度（℃），根据本规范附录 G 确定；

N_{e3} ——设计使用年限内或通车至首次针对车辙维修的期限内，设计车道上当量设计轴载累计作用次数，按本规范附录 A 计算；

h_i ——第 i 分层厚度（mm）；

h_0 ——车辙试验试件的厚度（mm）；

R_{0i} ——第 i 分层沥青混合料在试验温度为 60℃, 压强为 0.7MPa, 加载次数为 2 520 次时, 车辙试验永久变形量 (mm);

k_{Ri} ——综合修正系数, 按式 (B. 3.2-2) ~ 式 (B. 3.2-4) 计算;

$$k_{Ri} = (d_1 + d_2 \cdot z_i) \cdot 0.973^{1/5} \quad (\text{B. 3.2-2})$$

$$d_1 = -1.35 \times 10^{-4} h_a^2 + 8.18 \times 10^{-2} h_a - 14.50 \quad (\text{B. 3.2-3})$$

$$d_2 = 8.78 \times 10^{-7} h_a^2 - 1.50 \times 10^{-3} h_a + 0.90 \quad (\text{B. 3.2-4})$$

z_i ——沥青混合料层第 i 分层深度 (mm), 第一分层取为 15mm, 其他分层为路表距分层中点的深度;

h_a ——沥青混合料层厚度 (mm), h_a 大于 200mm 时, 取 200mm。

p_i ——沥青混合料层第 i 分层顶面竖向压应力 (MPa), 根据弹性层状体系理论, 按本规范第 6.2.2 条的规定选取计算点, 按式 (B. 3.2-5) 计算:

$$p_i = p \bar{p}_i \quad (\text{B. 3.2-5})$$

$$\bar{p}_i = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_{n-1}}{\delta}; \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{E_n}{E_{n-1}}\right)$$

\bar{p}_i ——理论压应力系数;

其他符号意义同式 (B. 1.1-3)。

B. 3.3 验算所得的沥青混合料层永久变形量应满足表 3.0.6-1 的容许永久变形量要求。否则, 应调整沥青混合料设计, 直至满足要求。

B. 3.4 满足沥青混合料层容许永久变形量要求的沥青混合料, 尚应满足本规范第 5.5.7 条标准车辙试验的动稳定性要求, 其永久变形量 R_0 对应的稳定性可用作沥青混合料的质量要求和施工控制指标。标准车辙试验温度为 60℃, 压强为 0.7MPa, 试件厚度为 50mm, 加载次数为 2 520 次时沥青混合料的动稳定性 DS , 可根据永久变形量 R_0 按式 (B. 3.4) 计算。

$$DS = 9365 R_0^{-1.48} \quad (\text{B. 3.4})$$

式中: DS ——沥青混合料动稳定性 (次/mm)。

B. 4 路基顶面竖向压应变验算

B. 4.1 路基顶面的容许竖向压应变应按式 (B. 4.1) 计算确定。

$$[\varepsilon_z] = 1.25 \times 10^{4-0.1\beta} (k_{T3} N_{eq})^{-0.21} \quad (\text{B. 4.1})$$

式中: $[\varepsilon_z]$ ——路基顶面容许竖向压应变 (10^{-6});

β ——目标可靠指标, 根据公路等级, 按表 3.0.1 取值;

N_{eq} ——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，按本规范附录 A 计算；

k_T ——温度调整系数，按本规范附录 G 确定。

B.4.2 应按本规范第 6.2.2 条的规定选取计算点，根据弹性层状体系理论，按式(B.4.2)计算路基顶面竖向压应变。路基顶面竖向压应变应小于容许压应变值。否则，调整路面结构方案，重新验算，直至满足要求。

$$\varepsilon_z = p \bar{\varepsilon}_z \quad (\text{B.4.2})$$

$$\bar{\varepsilon}_z = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_{n-1}}{\delta}; \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{E_n}{E_{n-1}}\right)$$

式中： $\bar{\varepsilon}_z$ ——理论竖向压应变系数；

其他符号意义同式(B.1.1-3)。

B.5 沥青面层低温开裂指数验算

B.5.1 季节性冻土地区沥青面层，应按式(B.5.1)验算其低温开裂指数 CI 。

$$CI = 1.95 \times 10^{-3} S_i lgb - 0.075(T + 0.07h_a) \lg S_i + 0.15 \quad (\text{B.5.1})$$

式中： CI ——沥青面层低温开裂指数；

T ——路面低温设计温度(℃)，为连续 10 年年最低气温平均值；

S_i ——在路面低温设计温度加 10℃ 试验温度条件下，表面层沥青弯曲梁流变试验加载 180s 时蠕变劲度(MPa)；

h_a ——沥青结合料类材料层厚度(mm)；

b ——路基类型参数，砂 $b=5$ ，粉质黏土 $b=3$ ，黏土 $b=2$ 。

B.5.2 沥青面层的低温开裂指数值，应满足表 3.0.6-2 的要求。否则，应改变所选用的沥青材料，直至满足要求。

B.6 防冻厚度验算

B.6.1 季节性冻土地区路基为中湿或潮湿状态时，应按式(B.6.1)计算公路多年最大冻深。

$$Z_{max} = abc Z_d \quad (\text{B.6.1})$$

式中： Z_{max} ——公路多年最大冻深(mm)；

Z_d ——大地多年最大冻深(mm)，根据调查资料确定；

a ——大地冻深范围内路基、路面各层材料热物性系数，按表 B.6.1-1 确定；

b——路基湿度系数，按表 B. 6. 1-2 确定；

c——路基断面形式系数，根据表 B. 6. 1-3 按内插法确定。

表 B. 6. 1-1 路基、路面材料热物性系数 *a*

路基材料	黏质土	粉质土	粉土质砂	细粒土质砂、黏土质砂	含细粒土质砾（砂）
热物性系数	1.05	1.10	1.20	1.30	1.35
路面材料	水泥混凝土	沥青结合料类	级配碎石	二灰或水泥稳定粒料	二灰土及水泥土
热物性系数	1.40	1.35	1.45	1.40	1.35

表 B. 6. 1-2 路基湿度系数 *b*

干湿类型	干燥	中湿	潮湿
湿度系数	1.0	0.95	0.90

表 B. 6. 1-3 路基断面形式系数 *c*

填挖形式和高(深)度	路基填土高度				路基挖方深度				
	零填	<2m	2~4m	4~6m	>6m	<2m	2~4m	4~6m	>6m
断面形式系数	1.0	1.02	1.05	1.08	1.10	0.98	0.95	0.92	0.90

B. 6. 2 根据公路多年最大冻深，按表 B. 6. 2 的规定验算路面的防冻厚度。路面结构厚度小于表 B. 6. 2 规定的最小防冻厚度时，应增设防冻层，使其满足最小防冻厚度的要求。

表 B. 6. 2 沥青路面结构最小防冻厚度 (mm)

路基 土质	基层、 底基层 材料类型	对应于以下公路多年最大冻深 Z_{\max} (mm) 和路基干湿类型的最小防冻厚度							
		中湿				潮湿			
		500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000	500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000
黏 性 土、 细 亚 砂 土	粒料类	400~450	450~500	500~600	600~700	450~550	550~600	600~700	700~800
	水泥或 石灰稳定 类、水泥 混凝土	350~400	400~450	450~550	550~650	400~500	500~550	550~650	650~750
	水泥粉 煤灰或石 灰粉煤灰 稳 定 类、 沥青结合 料类	300~350	350~400	400~500	500~550	350~450	450~500	500~550	550~700

续表 B. 6. 2

路基 土质	基层、 底基层 材料类型	对应于以下公路多年最大冻深 Z_{\max} (mm) 和路基干湿类型的最小防冻厚度							
		中湿				潮湿			
		500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	>2 000	500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	>2 000
粒料类	450~500	500~600	600~700	700~750	500~600	600~700	700~800	800~1 000	
水泥或 石灰稳定 类、水泥 混凝土	400~450	450~500	500~600	600~700	450~550	550~650	650~700	700~900	
粉性土	水混粉 煤灰或石 灰粉煤灰 稳定类、 沥青结合 料类	300~400	400~450	450~500	500~650	400~500	500~600	600~650	650~800

注：1. 在《公路自然区划标准》(JTJ 003—86) 中，对潮湿系数小于 0.5 的地区，Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 等干旱地区的防冻厚度可比表中值减少 15%~20%。
 2. 对Ⅱ区砂性土基防冻厚度应相应减少 5%~10%。
 3. 公路多年最大冻深大时，靠近上限取值，反之靠近下限取值。
 4. 基层、底基层采用不同材料类型时，按厚度较大的材料类型确定。

B. 7 设计路面结构的验收弯沉值

B. 7.1 路基顶面验收弯沉值 l_g ，应按式 (B. 7.1) 计算。

$$l_g = \frac{176pr}{E_0} \quad (\text{B. 7. 1})$$

式中：
 l_g ——路基顶面验收弯沉值 (0.01mm)；
 p ——落锤式弯沉仪承载板施加荷载 (MPa)；
 r ——落锤式弯沉仪承载板半径 (mm)；
 E_0 ——平衡湿度状态下路基顶面回弹模量 (MPa)。

B. 7.2 宜采用落锤式弯沉仪进行路基验收，落锤式弯沉仪荷载为 50kN，荷载盘半径应为 150mm。路基顶面实测代表弯沉值 l_0 应符合式 (B. 7.2-1) 的要求。

$$l_0 \leq l_g \quad (\text{B. 7. 2-1})$$

式中：
 l_g ——路基顶面验收弯沉值 (0.01mm)；
 l_0 ——路段内实测的路基顶面弯沉代表值 (0.01mm)，以 1~3km 为一评定路段，按式 (B. 7.2-2) 计算：

$$l_0 = (\bar{l}_0 + \beta \cdot s) K_1 \quad (B.7.2-2)$$

\bar{l}_0 ——路段内实测路基顶面弯沉平均值 (0.01mm);

s ——路段内实测路基顶面弯沉标准差 (0.01mm);

β ——目标可靠指标, 根据公路等级按表 3.0.1 取值;

K_1 ——路基顶面弯沉湿度影响系数, 根据当地经验确定。

B.7.3 路表验收弯沉值 l_a , 应根据设计路面结构, 采用弹性层状体系理论按式 (B.7.3) 计算。路面结构层参数应与路面结构验算时相同。路基顶面回弹模量应采用平衡湿度状态下路基顶面回弹模量乘以模量调整系数 k_t 。

$$l_a = p \bar{l}_a \quad (B.7.3)$$

$$\bar{l}_a = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_{n-1}}{\delta}; \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{E_n}{E_{n-1}}\right)$$

式中: \bar{l}_a ——理论弯沉系数;

k_t ——路基顶面回弹模量调整系数, 无机结合料稳定类基层沥青路面和水泥混凝土基层沥青路面, 取 0.5; 粒料类基层沥青路面和沥青结合料类基层沥青路面, 当采用无机结合料稳定底基层时, 取 0.5, 否则取 1.0;

E_0 ——平衡湿度状态下路基顶面回弹模量 (MPa)。

其他符号意义同式 (B.1.1-3)。

B.7.4 路面交 (竣) 工时应对路表弯沉值进行检测。落锤式弯沉仪中心点弯沉代表值应符合式 (B.7.4-1) 要求:

$$l_0 \leq l_a \quad (B.7.4-1)$$

式中: l_a ——路表验收弯沉值 (0.01mm);

l_0 ——路段内实测路表弯沉代表值 (0.01mm), 以 1~3km 为一个评定路段, 按 (B.7.4-2) 计算:

$$l_0 = (\bar{l}_0 + \beta \cdot s) K_1 K_3 \quad (B.7.4-2)$$

\bar{l}_0 ——路段内实测路表弯沉平均值 (0.01mm);

s ——路段内实测路表弯沉标准差 (0.01mm);

β ——目标可靠指标, 根据公路等级按表 3.0.1 取值;

K_1 ——路表弯沉湿度影响系数, 根据实测弯沉值通过反算得到路基模量值, 再对路基模量值进行修正得到结构模量值, 然后得出测试状态下弯沉湿度修正系数 K_1 , 或者根据当地经验确定;

K_3 ——路表弯沉温度影响系数, 按式 (B.7.4-3) 确定;

$$K_3 = e^{[9 \times 10^{-6} (\ln E_0 - 1) h_a + 4 \times 10^{-3}] (20 - T)} \quad (B.7.4-3)$$

T ——弯沉测定时沥青结合料类材料层中点实测或预估温度 (℃);

h_a ——沥青结合料类材料层厚度 (mm);

E_0 ——平衡湿度状态下路基顶面回弹模量 (MPa)。

附录 C 沥青路面结构方案

C.0.1 不同交通荷载等级时，沥青路面结构层厚度组合可参照表 C.0.1-1 ~ 表 C.0.1-6选用，也可根据当地工程经验确定。

表 C.0.1-1 无机结合料稳定类基层（粒料类底基层）路面厚度范围 (mm)

交通荷载等级	极重、特重	重	中等	轻
面层	250~150	250~150	200~100	150~20
基层（无机结合料稳定类）	600~350	550~300	500~250	450~150
底基层（粒料类）		200~150		

表 C.0.1-2 无机结合料稳定类基层（无机结合料稳定类底基层）路面厚度范围 (mm)

交通荷载等级	极重、特重	重	中等	轻
面层	250~120	250~100	200~100	150~20
基层（无机结合料稳定类）	500~250	450~200	400~150	500~200
底基层（无机结合料稳定类）		200~150		—

表 C.0.1-3 粒料类基层（粒料类底基层）路面厚度范围 (mm)

交通荷载等级	重	中等	轻
面层	350~200	300~150	200~100
基层（粒料类）	450~350	400~300	350~250
底基层（粒料类）		200~150	

表 C.0.1-4 沥青结合料类基层（粒料底基层）路面厚度范围 (mm)

交通荷载等级	重	中等	轻
面层	150~120	120~100	80~40
基层（沥青结合料类）	250~200	220~180	200~120
底基层（粒料类）	400~300	400~300	350~250

表 C.0.1-5 沥青结合料类基层（无机结合料稳定类底基层）路面厚度范围 (mm)

交通荷载等级	极重、特重	重	中等	轻
面层	120~100	120~100	100~80	80~40
基层（沥青结合料类）	180~120	150~100	150~100	100~80
底基层（无机结合料稳定类）	600~300	600~300	550~250	450~200

表 C.0.1-6 沥青结合料类基层（粒料+无机结合料底基层）路面厚度范围 (mm)

交通荷载等级	极重、特重	重	中等	轻
面层	120~100	120~100	100~80	80~40
基层（沥青结合料类）	240~160	180~120	160~100	100~80
底基层（粒料类）	200~150	200~150	200~150	200~150
底基层（无机结合料类）	400~200	400~200	350~200	250~150

C.0.2 结构层厚度应根据交通荷载等级、路基承载能力等因素选择。交通荷载等级高、路基承载能力弱时宜取靠近高限的厚度或参照高一个交通荷载等级的路面厚度范围，反之可靠近低限取值或参照低一个交通荷载等级的路面厚度范围。

附录 D 粒料类材料回弹模量试验方法

D.1 适用范围

D.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。

D.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。

D.2 仪器设备

D.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，如图 D.2.1 所示。

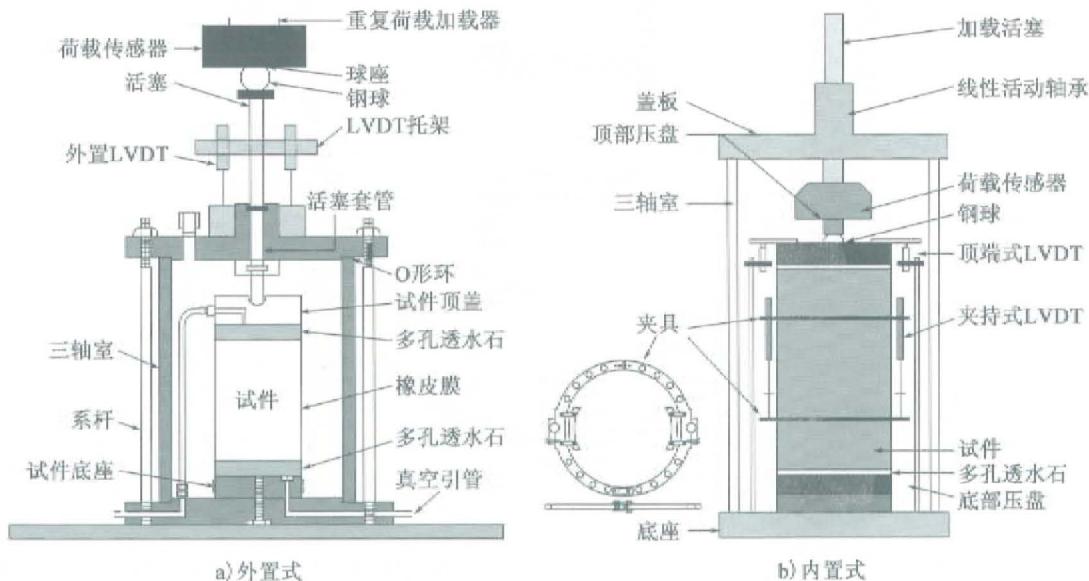


图 D.2.1 动三轴试验仪

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

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

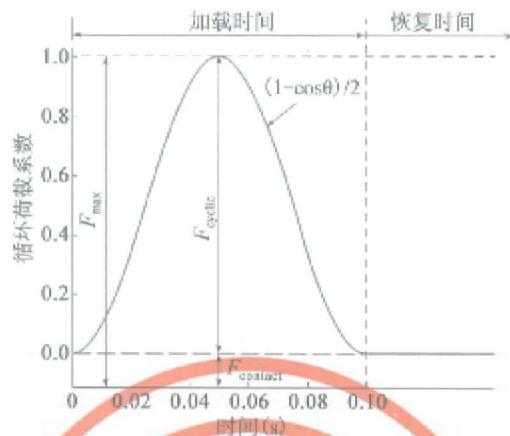


图 D. 2.3 半正弦形加载波

D. 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 D. 2.4 的要求。

表 D. 2.4 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

D. 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 $\pm 1\%$ ，位移量程应不小于 12.7mm ，可测量长度范围为 $63.5 \sim 127.0\text{mm}$ 。

2 非接触式逼近传感器和线性可变差动传感器应满足表 D. 2.5 的要求。

表 D. 2.5 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

*：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。当采用其他测量长度时，应对其进行修正。

D. 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 $\pm 0.02\%$ ，非线性度不大于 $\pm 0.5\%$ 。

D.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。

D.2.8 其他工具应包括测径器、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。

D.3 试件准备

D.3.1 最大粒径大于 19mm 粒料类材料的试件尺寸为：直径 × 高度 = $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，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 = $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。

D.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 $\pm 0.5\%$ 。

D.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 $\pm 1.0\%$ 。

D.4 试验步骤

D.4.1 每组试验前，应对测试系统进行校准。

D.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 形环或其他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。

D.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。

D.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。

D.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 1 000 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，必要时应重新制备试件测试。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。

D.4.6 按表 D.4.6 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 D.4.6 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_i (kPa)	最大轴向应力 σ_{ax} (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

续表 D. 4. 6

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_d (kPa)	最大轴向应力 σ_{ax} (kPa)	荷载作用次数
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

D. 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。

D. 5 回弹模量计算

D. 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。

D. 5. 2 应根据测试所得的相关数据和式 (D. 5. 2) 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 。

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (\text{D. 5. 2})$$

式中: M_R —回弹模量 (MPa);

θ —体应力 (MPa);

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

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

τ_{oct} ——八面体剪应力 (MPa);

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

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

p_a ——参考气压 (MPa)。

D.6 试验报告

D.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%。

D.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。

附录 E 无机结合料稳定类材料单轴压缩模量试验方法

E. 1 适用范围

E. 1. 1 本方法适用于无机结合料稳定类材料试件侧面法单轴压缩弹性模量试验。

E. 1. 2 可室内成型或现场钻取试件。

E. 2 仪器设备

E. 2. 1 应采用配备伺服液压或气压材料试验系统的试验机，测量精度不应低于 $\pm 1\%$ ，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。

E. 2. 2 加载板可采用硬质钢板或高强度铝板，其直径应不小于试件直径，应分别置于试件的底部和顶部。

E. 2. 3 轴向变形 Δl 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 $1\mu\text{m}$ 。测点应位于试件侧面中部3条偏移角度为 120° 的平行直线上，测点间距 L 不应小于集料最大粒径的4倍。试件顶面距离测点端部不应小于15mm。

E. 2. 4 应按图E. 2. 4所示安装位移传感器，刚性环应通过螺栓固定在圆柱体试件侧面，螺栓端部应为半球形。3个位移传感器应固定在其中一个刚性环上。

E. 2. 5 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。

E. 2. 6 试件切割机宜采用双面锯，能保证试件两个锯面平行时可采用单面锯。

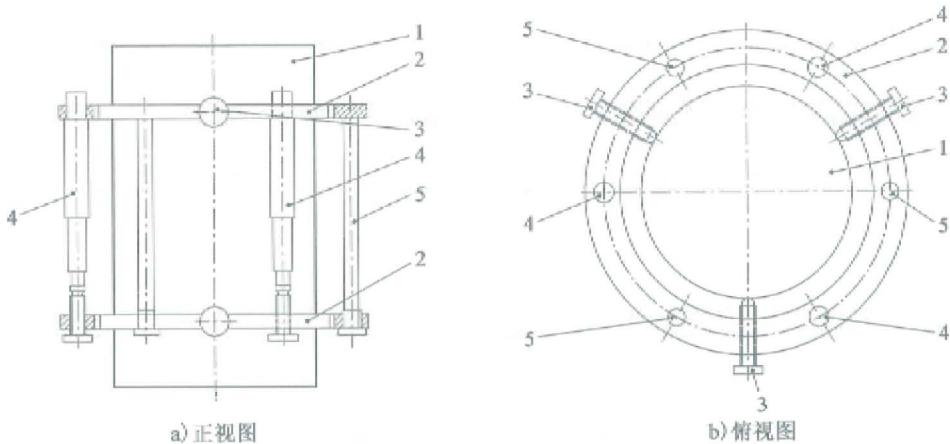


图 E.2.4 传感器安装图
1-试件；2-刚性环；3-螺栓；4-传感器；5-可拆卸螺栓

E.3 试件准备

E.3.1 可根据现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51) T 0843 成型圆柱体试件，也可从成型梁式试件或路面现场钻取试件。试件应形状规则、侧面光滑平整，可采用 3 种试件规格：直径×高度 = $\phi 100\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、直径×高度 = $\phi 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 或直径×高度 = $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。

E.3.2 采用切割机切割试件两端，应保证试件高度为 $150\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 或 $300\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 。端面沿直径方向沟纹允许高差为 $\pm 0.05\text{mm}$ ，试件上下端面与试件轴向应垂直，允许偏差为 $\pm 1^\circ$ ，否则应舍弃该试件。

E.3.3 在试件中部和距上下表面 $1/3$ 试件高度的 3 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和标准差，允许标准差为 2.5mm ，不满足时应舍弃该试件。对直径符合要求的试件，后续计算中直径取 6 个直径测量值的平均值，精确至 0.1mm 。

E.3.4 试件上下两个端面应采用水泥净浆彻底抹平。将试件直立桌面上，在上端面用早强水泥净浆薄涂一层后，应在表面撒少量粒径为 $0.25 \sim 0.5\text{mm}$ 的细砂，并用直径大于试件的平面圆形钢板放在顶面，加压旋转圆钢板，使顶面齐平，边旋转边平移并迅速取下钢板。当净浆黏附于钢板上时，应重新用净浆抹平，并重复上述步骤。一个端面整平后，放置 4h 以上，按同样方法整平另一端面。整平后试件尺寸应满足本规范第附录 E.3.2 条的要求。

E.3.5 应根据现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51) T 0845