

铁路无砟轨道混凝土高低周疲劳加载试验技术规范

Technical specification for high and low cycle fatigue loading test of ballastless track
concrete in railway

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 基本规定	5
3.1 高周疲劳荷载取值	5
3.2 低周疲劳荷载取值	6
3.3 试件的尺寸	7
4 混凝土	9
4.1 原材料	9
4.2 配合比	14
4.3 抗压强度	16
4.4 耐久性	17
5 其他材料	18
5.1 CRTS I型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆	18
5.2 CRTS II型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆	19
5.3 CRTS III型板式无砟轨道自密实混凝土	20
6 无砟轨道混凝土高周疲劳加载试验	22
7 无砟轨道混凝土低周疲劳加载试验	25
8 无砟轨道混凝土高低周疲劳加载试验	28
附录 A 应力水平取值方法	29
附录 B 冲击弹性波法	30
附录 C 冻融-疲劳交互试验方案	32

1 总 则

1.0.1 为了规范铁路无砟轨道混凝土高低周疲劳加载试验规程，提高无砟轨道混凝土试验和评估水平，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于寒区无砟轨道混凝土疲劳加载试验。

1.0.3 无砟轨道混凝土高低周疲劳加载试验除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 轨道 track

路基、桥梁、隧道等线下结构物以上的线路部分，由钢轨及配件、轨枕及配件、道床、道岔及钢轨伸缩调节器等组成。

2.1.2 无砟轨道 ballastless track

用钢筋混凝土等整体结构作为轨下基础的轨道结构。

2.1.3 CRTS I 型板式无砟轨道 CRTS I ballastless track

在现场浇筑的钢筋混凝土底座上铺装预制轨道板，通过水泥乳化沥青砂浆进行调整，通过凸形挡台进行限位的单元板式无砟轨道结构形式。

2.1.4 CRTS II 型板式无砟轨道 CRTS II ballastless track

在现场摊铺的混凝土支承层或现场浇筑的钢筋混凝土底座上铺装预制轨道板，通过水泥乳化沥青砂浆进行调整的纵连板式无砟轨道结构形式。

2.1.5 CRTS III 型板式无砟轨道 CRTS III ballastless track

在现浇的钢筋混凝土底座上铺装带挡肩的预制轨道板，通过自密实混凝土进行调整，通过板下门形筋、自密实混凝土和底座上凹槽进行限位的单元板式无砟轨道结构形式。

2.1.6 CRTS 双块式无砟轨道 CRTS bi-block sleeper ballastless track

将预制的双块式轨枕组装成轨排，以现场浇筑混凝土方式将轨枕浇筑到钢筋混凝土道床内，并适应轨道电路的无砟轨道结构形式。

2.1.7 设计使用年限 design service life

正常使用和维护状态下，设计规定的结构或构件不需进行大修即可按预定目的使用的年限。

2.1.8 高周疲劳 high cycle fatigue

无砟轨道混凝土材料在设计寿命周期内承受超过 $10^4 \sim 10^5$ 次的荷载作用，称为高周疲劳，一般情况下可达到 10^7 次，本规程重点考虑列车荷载作用。

2.1.9 低周疲劳 low cycle fatigue

无砟轨道混凝土材料在设计寿命周期内承受不超过 $10^4 \sim 10^5$ 次的荷载作用，

称为低周疲劳，本规程重点考虑寒区冻融循环荷载作用。

2.1.10 高低周疲劳 high and low cycle fatigue

无砟轨道在服役过程中经受高周和低周荷载作用下的经时疲劳行为，称为高低周疲劳，本规程重点考虑列车荷载和冻融循环交互作用。

2.2 符号

f_f ——混凝土抗折强度（MPa）

F ——试件破坏荷载（N）

L ——支座间跨度（mm）

b ——试件截面宽度（mm）

h ——试件截面高度（mm）

f ——疲劳荷载加载频率（Hz）

v ——列车运行速度（m/s）

l_1 ——列车转向架固定轴距（m）

l_2 ——车辆长度（m）

m ——车辆转向架个数

n ——每个转向架轮对数

N_d ——单日投入运行的列车对数

N_{g1} 、 N_{g2} ——不同编组的列车车厢数（节）

p_1 、 p_2 ——不同编组的列车占投入运行列车的比例

N_w ——每一节车厢的轮对数

P ——轮轨垂向力在轮轨力最大值附近出现的概率

Y ——天数

$[]$ ——取整符号

N_h ——取整后的疲劳加载次数

K ——为自然冻融与室内快速冻融间损伤比例系数

R_{AT} ——快速试验条件下混凝土的劣化速度

R_{LT} ——实际情况下混凝土的劣化速度

N_a ——自然冻融环境下混凝土最大冻融循环次数

N_l ——室内快速冻融环境下混凝土最大冻融循环次数

ΔW_n ——第 N_l 次冻融后的质量损失率，精确至 0.01

W_0 ——第 0 次冻融后的试件质量 (g)

W_n ——第 N_l 次冻融后的试件质量 (g)

3 基本规定

3.1 高周疲劳荷载取值

3.1.1 试件的高周疲劳荷载取值应考虑荷载的大小、频率和次数。

3.1.2 试件高周疲劳荷载大小取值由应力等效原理决定，数值上等于试件抗折强度对应荷载与所受应力水平的乘积，应力水平取值方法可参考本规程附录 A 的规定。

3.1.3 测定无砟轨道混凝土初始抗折强度试验的试件尺寸应符合国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019 中第 10.0.2 条的规定。初始抗折强度应按式（3.1.3）计算：

$$f_f = \frac{FL}{bh^2} \times 0.85 \quad (3.1.3)$$

式中： f_f ——混凝土抗折强度（MPa）；

F ——试件破坏荷载（N）；

L ——支座间跨度（mm）；

b ——试件截面宽度（mm）；

h ——试件截面高度（mm）。

3.1.4 列车高周疲劳荷载频率与所计算车轮间的相对距离有关，若按单个转向架轴距计算，荷载频率应按式（3.1.4-1）计算；若按整个车辆长度计算，荷载频率应按式（3.1.4-2）计算：

$$f = \frac{v}{l_1} \quad (3.1.4-1)$$

$$f = m \cdot n \frac{v}{l_2} \quad (3.1.4-2)$$

式中： f ——疲劳荷载加载频率（Hz）；

v ——列车运行速度（m/s）；

l_1 ——列车转向架固定轴距（m）；

l_2 ——车辆长度（m）；

m ——车辆转向架个数；

n ——每个转向架轮对数。

3.1.5 试验考虑等幅疲劳加载，宜选取轮轨力统计中出现频次最大的进行疲劳次数计算，疲劳次数应按下式（3.1.5）计算：

$$N_h = \left[\left(N_d \times p_1 \times N_{g1} \times N_w + N_d \times p_2 \times N_{g2} \times N_w + \dots \right) \times Y \times P \right] \quad (3.1.5)$$

式中： N_d —— 单日投入运行的列车对数；

N_{g1} 、 N_{g2} —— 不同编组的列车车厢数（节）；

p_1 ， p_2 —— 不同编组的列车占投入运行列车的比例；

N_w —— 每一节车厢的轮对数；

P —— 轮轨垂向力在轮轨力最大值附近出现的概率；

Y —— 天数；

$[\]$ —— 取整符号；

N_h —— 取整后的疲劳试验加载次数。

3.2 低周疲劳荷载取值

3.2.1 无砟轨道低周疲劳以寒区冻融循环荷载为例，试件的低周疲劳荷载取值应考虑冻融温度及冻融次数。

3.2.2 无砟轨道混凝土低周疲劳温度荷载取值应符合国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/50082-2009 中第 4.2.4 条的规定，在冷冻和融化过程中，试件中心最低和最高温度应分别控制在 $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ 内。在任意时刻，试件中心温度不得高于 7°C ，且不得低于 -20°C 。

3.2.3 冻融次数应根据统计分析不同年份最高、最低气温差别和不同年份负温的天数及可能产生的冻融循环次数来确定。

3.2.4 材料在室内加速试验环境下的失效机理与自然环境下大致相同，两者间关系应按下式（3.2.4）计算：

$$K = R_{AT} / R_{LT} \quad (3.2.4)$$

式中： K —— 为自然冻融与室内快速冻融间损伤比例系数；

R_{AT} —— 快速试验条件下混凝土的劣化速度；

R_{LT} —— 实际情况下混凝土的劣化速度。

3.2.5 损伤比例系数 K 宜符合表 3.2.5 的规定。

表 3.2.5 我国四种典型地区的损伤比例系数表

气候区最冷月平均气温 (°C)	≤-8	-4~-8	0~-4	≥0
受冻等级	严重受冻区	受冻区	微冻区	偶冻区
损伤比例系数 K	7	12	17	23

3.2.6 混凝土自然冻融损伤劣化速度较慢，持续时间较长，通过快速冻融间损伤比例系数得室内快速冻融循环次数以减小研究所需时间应按下式 (3.2.6) 计算：

$$N_t = \left[\frac{N_a}{K} \right] \quad (3.2.6)$$

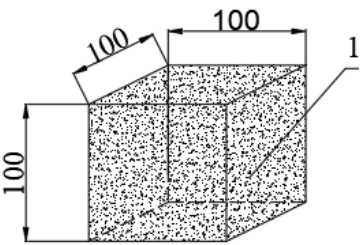
式中： N_a —自然冻融环境下混凝土最大冻融循环次数；

N_t —室内快速冻融环境下混凝土最大冻融循环次数。

3.3 试件的尺寸

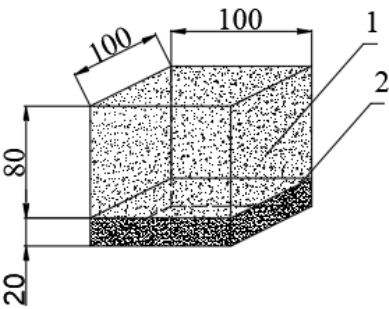
3.3.1 1:1 足尺无砟轨道混凝土模型浇筑时间长、试验场地受限，难以在室内大量、重复加载使用，且不方便测试，宜采用立方体及棱柱体两种试件类型。

1 立方体试件及立方体组合试件，整体尺寸为 100mm×100mm×100mm（图 3.3.1-1 和图 3.3.1-2）。



1-轨道板混凝土

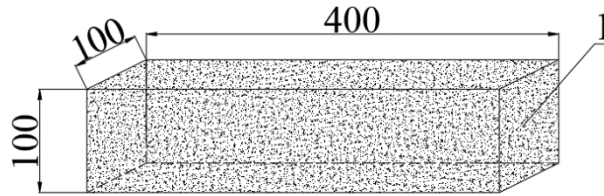
图 3.3.1-1 100mm×100mm×100m 立方体试件



1-轨道板混凝土；2-调整层混凝土

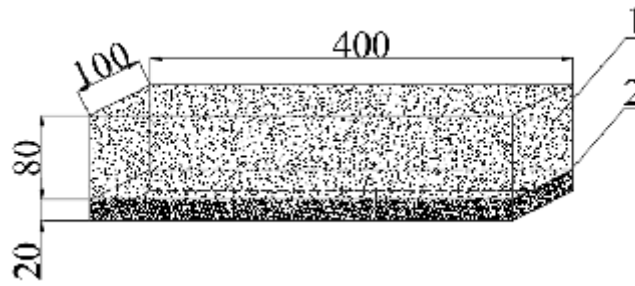
图 3.3.1-2 100mm×100mm×100mm 立方体试件

2 棱柱体试件及棱柱体组合试件，整体尺寸为 100mm×100mm×400mm（图 3.3.1-3 和图 3.3.1-4）。



1-轨道板混凝土

图 3.3.1-3 100mm×100mm×400mm 棱柱体试件



1-轨道板混凝土；2-调整层混凝土

图 3.3.1-4 100mm×100mm×400mm 棱柱体试件组合试件

4 混凝土

4.1 原材料

4.1.1 水泥应选用通用硅酸盐水泥，不宜使用早强水泥。C30 及以上的混凝土应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，C30 以下的混凝土可采用粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥。水泥性能除应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定外，还应符合表 4.1.1 的规定。

表 4.1.1 水泥的性能

项目	技术要求
比表面积(m ² /kg)	300~350
碱含量	≤0.80%
游离氧化钙含量	≤1.0%
熟料中铝酸三钙含量	≤8.0%

注：当骨料具有碱-骨料反应活性时，水泥的碱含量不应超过 0.60%。C40 及以上混凝土用水泥的碱含量不宜超过 0.60%。

4.1.2 粉煤灰、矿粉等矿物掺和料应选用能改善混凝土性能且品质稳定的产品。矿物掺和料性能应符合表 4.1.2-1~表 4.1.2-2 的规定。

表 4.1.2-1 粉煤灰的性能

项目	技术要求	
	I 级	II 级
细度(45μm 方孔筛筛余)	≤12.0%	≤30.0%
需水量比	≤95%	≤105%
烧失量	≤5.0%	≤8.0%
氯离子含量	≤0.02%	
含水量	≤1.0%	
三氧化硫含量	≤3.0%	
半水亚硫酸钙含量 ^②	≤3.0%	
氧化钙含量	≤10%	
游离氧化钙含量	≤1.0%	
二氧化硅、三氧化二铝和三氧化二铁总含量	≥70%	
密度(g/cm ³)	≤2.6	

活性指数	28 d	≥70%
碱含量 ^③		—

注 1 当混凝土结构所处的环境为严重冻融破坏环境时，宜采用烧失量不大于 3.0% 的粉煤灰。

2 当采用干法或半干法脱硫工艺排出的粉煤灰时，应检测半水亚硫酸钙 (CaSO₃ · 1/2H₂O) 含量。

3 碱含量用于计算混凝土的总碱含量。

表 4.1.2-2 矿粉的性能

项目		技术要求		
		S75	S95	S105
密度(g/cm ³)		≥2.8		
比表面积(m ² /kg)		≥300	≥400	≥500
流动度比		≥95%		
烧失量		≤3.0%		
氧化镁含量		≤14.0%		
三氧化硫含量		≤4.0%		
氯离子含量		≤0.06%		
含水量		≤1.0%		
活性指数	7 d	≥55%	≥75%	≥95%
	28 d	≥75%	≥95%	≥105%
碱含量 ^①		—		

注：碱含量用于计算混凝土的总碱含量。

4.1.3 细骨料应选用级配合理、质地坚固、吸水率低、空隙率小的洁净天然河砂或母材检验合格、经专门机组生产的机制砂，不应使用海砂。细骨料的性能应符合表 4.1.3-1~表 4.1.3-2 的规定。

表 4.1.3-1 细骨料的性能

项目	技术要求		
	<C30	C30 ~ C45	≥C50
颗粒级配	应符合本规程表 4.1.3-2 规定		
含泥量	≤3.0%	≤2.5%	≤2.0%
泥块含量	≤0.5%		

云母含量		$\leq 0.5\%$		
轻物质含量		$\leq 0.5\%$		
有机物含量		浅于标准色		
压碎指标(机制砂)		$\leq 25\%$		
石粉含量 (机制砂)	MB<0.5 g/kg	$\leq 15.0\%$		
	0.5 g/kg $\leq$ MB<1.40 g/kg	$\leq 10.0\%$	$\leq 7.0\%$	$\leq 5.0\%$
	MB $\geq$ 1.40 g/kg	$\leq 5.0\%$	$\leq 3.0\%$	$\leq 2.0\%$
吸水率		$\leq 2.0\%$		
坚固性		$\leq 8\%$		
硫化物及硫酸盐含量(以 SO ₃ 计)		$\leq 0.5\%$		
氯化物含量(以 Cl ⁻ 计)		$\leq 0.02\%$		
碱活性(快速砂浆棒膨胀率)(ϵ_1) ^③		$< 0.30\%$		

注：1 当细骨料中含有颗粒状的硫酸盐或硫化物杂质时，应进行专门试验研究，确认能满足混凝土耐久性要求后，方能使用。

2 冻融破坏环境下，细骨料的含泥量不应大于 2.0%，吸水率不应大于 1.0%。

表 4.1.3-2 细骨料的累积筛余百分数

方孔筛筛孔尺寸 mm		级配区		
		I 区	II 区	III 区
4.75		10% ~ 0	10% ~ 0	10% ~ 0
2.36		35% ~ 5%	25% ~ 0	15% ~ 0
1.18		65% ~ 35%	50% ~ 10%	25% ~ 0
0.60		85% ~ 71%	70% ~ 41%	40% ~ 16%
0.30		95% ~ 80%	92% ~ 70%	85% ~ 55%
0.15	天然河砂	100% ~ 90%	100% - 90%	100% ~ 90%
	机制砂	97% ~ 85%	94% - 80%	94% ~ 75%

注：除 4.75 mm 和 0.60 mm 筛外，细骨料其他筛档的实际累积筛余百分率与本表相比允许有超出分界线，但超出总量不应大于 5%。

4.1.4 粗骨料应选用粒形良好、级配合理、质地坚固、吸水率低、线胀系数小的洁净碎石。粗骨料的性能应符合表 4.1.4-1~表 4.1.4-3 的规定。

表 4.1.4-1 粗骨料的性能

项目	技术要求		
	<C30	C30 ~ C45	$\geq$ C50

颗粒级配		应符合本规程表 4.1.4-2 规定		
压碎指标		应符合本规程表 4.1.4-3 规定		
针片状颗粒总含量		≤10%	≤8%	≤5%
含泥量		≤1.0%	≤1.0%	≤0.5%
泥块含量		≤0.2%		
岩石抗压强度(碎石)		大于或等于 1.5 倍混凝土抗压强度等级		
吸水率		≤2.0%(冻融破坏环境下≤1.0%)		
紧密空隙率		≤40%		
坚固性		≤8%(用于预应力混凝土结构时≤5%)		
硫化物及硫酸盐含量(以 SO ₃ 计)		≤0.5%		
氧化物含量(以 Cl ⁻ 计)		≤0.02%		
有机物含量(卵石)		浅于标准色		
碱活性(ε ₁)	碱-硅酸反应 ^③	<0.30%(快速砂浆棒膨胀率)		
	碱-碳酸盐反应	<0.10%(岩石性膨胀率)		

注：1 当粗骨料为碎石时，岩石抗压强度用其母岩抗压强度表示。

2 施工过程中，粗骨料的强度可用压碎指标进行控制。

表 4.1.4-2 粗骨料的累积筛余质量百分数

公称粒级 mm	方孔筛筛孔边长尺寸 mm								
	2.36	4.75	9.5	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	53
5~10	95%~100%	80%~100%	0~15%	0	—	—	—	—	—
5-16	95%~100%	85%~100%	30%~60%	0~10%	0	—	—	—	—
5~20	95%~100%	90%~100%	40%~80%	—	0~10%	0	—	—	—
5-25	95%~100%	90%~100%	—	30%~70%	—	0~5%	0	—	—
5~31.5	95%~100%	90%~100%	70%~90%	—	15%~45%	—	0~5%	0	—
5~40	—	95%~100%	70%~90%	—	30%~65%	—	—	0~5%	0

注：1 粗骨料的公称粒径不宜超过钢筋的混凝土保护层厚度的 2/3，在严重腐蚀环境下不宜超过 1/2，且不应超过钢筋最小间距的 3/4。

2 配制强度等级 C50 及以上混凝土时，粗骨料最大公称粒径不应大于 25mm。

表 4.1.4-3 粗骨料的压碎指标

混凝土强度等级	<C30			≥C30		
岩石种类	沉积岩	变质岩或深成的火成岩	喷出的火成岩	沉积岩	变质岩或深成的火成岩	喷出的火成岩
碎石	≤16%	≤20%	≤30%	≤10%	≤12%	≤13%
卵石	≤16%			≤12%		

注：沉积岩包括石灰岩、砂岩等，变质岩包括片麻岩、石英岩等，深成的火成岩包括花岗岩、正长岩、闪长岩和橄榄岩等，喷出的火成岩包括玄武岩和辉绿岩等。

4.1.5 减水剂宜选用高效减水剂或高性能减水剂。减水剂性能应符合表 4.1.5 的规定。

表 4.1.5 减水剂的性能

项目		技术要求	
含气量		≤3.0%	>3.0%
含气量经时变化量	1 h	—	-1.5% ~ +1.5%
减水率	高效减水剂	≥20%	
	高性能减水剂	≥25%	
泌水率比	高效减水剂	≤20%	
	高性能减水剂	≤20%	
压力泌水率比(用于泵送混凝土时)		≤90%	
硫酸钠含量(按折固含量计)	高效减水剂	≤10.0%	
	高性能减水剂	≤5.0%	
氧离子含量(按折固含量计)		≤0.6%	
碱含量(按折固含量计)		≤10%	

4.1.6 拌和用水可采用饮用水，当采用其他来源的水时，其性能应符合表 4.1.6 的规定。

表 4.1.6 拌合用水的性能

项目	技术要求		
	预应力混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
pH值	>6.5	>6.5	>6.5
不溶物含量(mg/L)	<2000	<2000	<5000
可溶物含量(mg/L)	<2000	<5000	<10000
氧化物含量(以Cl ⁻ 计)mg/L	<500	<1000	<3500

		<350(用钢丝或热处理的钢筋)		
		<200(混凝土处于氧盐环境下)		
硫酸盐含量(以 SO_4^{2-} 计)mg/L		<600	<2000	<2700
碱含量(mg/L)		<1500	<1500	<1500
抗压强度比	28 d	$\geq 90\%$		
凝结时间差(min)		≤ 30		

注：对于钢筋配筋率低于最小配筋率的混凝土结构，其混凝土拌合水性能亦应满足本表中钢筋混凝土用拌合水性能要求。

4.2 配合比

4.2.1 混凝土的原材料和配合比参数应根据混凝土结构的设计使用年限、所处环境条件、环境作用等级和施工工艺等确定。

4.2.2 混凝土中应根据需要掺加能够改善混凝土性能的粉煤灰、矿粉等矿物掺合料。

4.2.3 混凝土中应掺加能够改善混凝土性能的减水剂，减少用水量和胶凝材料。

4.2.4 混凝土配合比应按最小浆体比原则进行设计。混凝土配合比的设计方法既可采用体积法，也可采用质量法。

4.2.5 混凝土的总碱含量应符合行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275-2018 中第 7.1.5 条的规定。

4.2.6 不同强度等级混凝土的胶凝材料用量不宜超过表 4.2.6 所规定的限值要求。

表 4.2.6 混凝土的胶凝材料最大用量 (kg/m^3)

混凝土强度等级	成型方式	
	振动成型	自密实成型
<C30	360	—
C30 ~ C35	400	550
C40 ~ C45	450	600
C50	480	—
C55 ~ C60	500	—

4.2.7 冻融环境下混凝土的胶凝材料用量不宜低于表 4.2.7 所规定的限值要求。

表 4.2.7 混凝土的胶凝材料最小用量 (kg/m^3)

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/377034106165006052>