T/CECS G：

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

道路工程高韧性高耐久性水泥混凝土技术规程

Technical specification for high toughness and high durability cement concrete for road engineering

征询意见稿

中国工程建设标准化协会　发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

征询意见稿

中 国 工 程 建 设 协 会 标 准

道路工程高韧性高耐久性水泥混凝土技术规程

Technical specification for high toughness and high durability cement concrete for road engineering

T/CECS G：

主编单位：新疆大学

批准部门：中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会

实施日期：　年　月　日

征询意见稿

人民交通出版社股份有限公司

征询意见稿

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022 年第二批工程建设协会标准（CECS G）制修订项目编制工作〉的通知》（中建标公路〔2022〕289 号）要求，由新疆大学承担《道路工程高韧性高耐久性水泥混凝土技术规程》（以下简称 “本规程”）的制定工作。

编写组在总结近年来混凝土品质控制、应用经验和相关科研成果的基础上，以规范混凝土韧性提升的性能要求和质量控制为核心，完成了本规程的编写工作。

本规程分为 5 章，主要内容包括总则、术语和定义、材料、混凝土配合比设计、混凝土质量检验。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，由新疆大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或新疆大学（地址：新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区 华瑞街 777 号 新疆大学博达校区，邮编：830049）。

主 编 单 位：新疆大学

参 编 单 位：交通运输部公路科学研究院
新疆交通建设集团股份有限公司
中关村中科公路养护产业技术创新联盟
新疆新山子高科技有限公司
新疆新路顺杰工程咨询有限公司
新疆生产建设兵团建设工程（集团）有限责任公司
兵团设计院
浙江润惟创福斯科技有限公司

主 要 起 草 人：

主 要 审 查 人：

征求意见稿

目录

1 范围 1
2 术语和定义 1
3 材料 5
3.1 一般规定 5
3.2 材料性能 6
4 混凝土配合比设计 12
5 混凝土质量检验 18
5.1 原材料检验 18
5.2 力学性能检验 19
5.3 耐久性能检验 20
5.4 检验要求 20
附录 A 高韧性混凝土弯曲韧性试验方法 24
附录 B 高韧性混凝土力学性能快速检验评定方法 27
附录 C 高韧性混凝土力学性能现场检验评定方法 29
附录 D 氯离子扩散系数试验方法 34
附录 E 氯离子扩散系数试验方法 40
附录 F 混凝土抗冻性能测试方法 45

征询意见稿

1 总则

1.0.1 为适应我国道路工程建设高质量发展需求，规范道路工程高性能水泥及高韧性高耐久性水泥混凝土的产品质量、技术要求和工程应用，提升水泥混凝耐久性，延长结构服役寿命，制定本规程。

1.0.2 规程适用于道路工程高性能水泥的加工生产和质量控制，以及新建、改扩建公路、城市道路、机场道面、桥面铺装等工程中对韧性和耐久性有较高要求的水泥混凝土结构。其他行业对韧性和耐久性有较高要求的水泥混凝土结构可参照本规程执行。

1.0.3 道路工程高性能水泥及高韧性高耐久性水泥混凝土所用原材料和产品应按本规程规定进行质量检测；不合格原材料使用。

1.0.4 在符合国家生态环境保护、绿色道路建设和低碳发展规定的前提下，应积极采用技术可靠、经济合理的新型胶凝材料，以及机制砂、再生骨料、风积沙等特色或替代性细骨料，加强其在高韧性高耐久性水泥混凝土工程中的应用。

1.0.5 工程应用应减少能源和材料消耗，降低碳排放，保护水土环境。

1.0.6 道路工程高性能水泥及高韧性高耐久性水泥混凝土除应符合本规程规定外，应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.0.1 机制砂 manufactured sand

经破碎、整形、筛分并经必要除尘处理得到的人工砂。

2.0.2 机制砂混凝土 manufactured sand concrete

以机制砂作为主要细骨料（可全部或部分替代天然砂）配制的高韧性高耐久性水泥基混凝土。

2.0.3 再生骨料 recycled aggregate

由废弃混凝土、废弃砂浆等经破碎、筛分及必要处理得到的骨料，包括再生粗骨料与再生细骨料。

2.0.4 再生骨料混凝土 recycled aggregate concrete

以再生骨料（再生粗骨料和/或再生细骨料）替代部分或全部天然骨料配制的高韧性高耐久性水泥基混凝土。

2.0.5 细颗粒/含泥砂 fine-particles/clay-contaminated sand

细颗粒（粉土/黏土或石粉）含量相对较高、对需水量与外加剂敏感性显著的砂类材料。

2.0.6 细颗粒/含泥砂混凝土 fine-particles/clay-contaminated sand concrete

以细颗粒/含泥砂作为全部或部分细骨料，并通过外加剂与改性措施使其满足本文件性能要求的高韧性高耐久性水泥基混凝土。

2.0.7 激发改性剂 activator-modifier

用于对风积沙中细颗粒/含泥惰性组分进行定向激发或界面改性、改善分散与水化反应、提升界面结构与耐久性能的外加材料（可为复合型产品）。

2.0.8 高韧性混凝土 high toughness concrete (HTC)

征询意见稿

由水泥、矿物掺合料、外加剂、骨料、钢纤维和水等原材料拌合后水化而成的具有高抗冻性和韧性性能，氯离子扩散系数不大于 20×10^{-14} m^2/s、极限抗拉强度不小于 5 MPa、抗压强度不小于 100 MPa 且弯曲韧性比不小于 0.8 的混凝土材料。

2.0.9 韧性指数 toughness index

高韧性混凝土在受力过程中能够继续承受载荷而不断变形的能力衡量指标。

2.0.10 弯曲初裂强度 bending initial crack strength

由弯曲荷载作用下混凝土构件开裂荷载计算得到的弯曲强度。

2.0.11 等效弯曲强度 equivalent bending strength

由弯曲荷载-挠度曲线计算出表征纤维混凝土弯曲性能的强度参数。

2.0.12 弯曲韧性比 bending toughness ratio

等效弯曲强度与弯曲初裂强度的比值。

2.0.13 高耐久性混凝土 durable concrete

指通过材料设计与工艺控制，其抗冻等级等指标显著高于普通道路混凝土，在设计使用环境下能长期维持其性能与完整性的水泥混凝土。高性能混凝土抗冻性能等级划分为 F250、F300、F350、F400 和大于 F400。

2.0.14 抗冻耐久性指数 durability factor

采用标准试验方法、经规定次数快速冻融循环后混凝土的动弹性模量与初始动弹性模量的比值，通常用百分比表示。

2.0.15 引气 air entrainment

混凝土拌合时用表面活性剂在混凝土中形成均匀、稳定、球形封闭微气泡的工艺措施。

2.0.16 含气量 air content in concrete

混凝土中气泡体积与混凝土总体积的比值，用百分数表示。

2.0.17 合成纤维 synthetic fiber

以合成高分子化合物为原料制成的化学纤维。常用品种有聚丙烯睛、聚酷胺、聚乙烯醇、聚丙烯纤维等。

2.0.18 混凝土抗冻等级 resistance class to freezing-thawingof concrete

用快冻法测得的最大冻融循环次数来划分的混凝土的抗冻性能等级。

2.0.19 电通量法 test method for coulomb electric flux

用通过混凝土试件的电通量来反映混凝土抗氯离子渗透性能的试验方法。

2.0.20 快速氯离子迁系数法 test method for rapid chlorideions migration coefficient(RCM)

通过测定混凝土中氯离子渗透深度，计算得到氮离子迁移系数来反映混凝土抗氯离子渗透性能的试验方法，简称为 RCM 法。

2.0.21 抗硫酸盐等级 resistance class to sulphate attack of concrete

用抗硫酸盐侵蚀试验方法测得的最大干湿循环次数来划分的混凝土抗硫酸盐侵蚀性能等级。

2.0.22 碱骨料反应 alkali-aggregate reaction（AAR）

骨料中特定内部成分在一定条件下与混凝土中的水泥、外加剂、掺合剂等中

的碱物质进一步发生化学反应，导致混凝土结构产生膨胀、开裂甚至破坏的现象。

2.0.23 风积沙双高混凝土

指以风积沙作为主要或部分细骨料，通过复合胶凝体系、纤维增韧、外加剂协同等技术手段配制而成，同时满足本规程规定的高韧性与高耐久性指标要求的道路工程水泥混凝土

3 材料

3.1 一般规定

3.1.1 原材料应符合本文件及现行相关标准的规定，并应具有可追溯的出厂合格证明文件和检验报告。

3.1.2 当采用机制砂、再生骨料、风积沙等非传统或质量波动较大的骨料时，应进行充分的材料调查与工程适用性验证；当料源、产地或加工工艺发生变化时，应重新检验与验证。采用风积沙作为细骨料时，应进行专门的适应性验证，并关注其细颗粒含量、含泥量、盐分等对工作性、韧性和耐久性的影响。

条文说明

机制砂、再生骨料、风积沙等非传统骨料与天然骨料相比，在粒形、级配、石粉（泥）含量、吸水率和可溶盐含量等方面差异显著，且质量受料源和加工工艺影响波动较大，直接影响外加剂吸附量、拌合物工作性以及硬化混凝土的韧性和耐久性。风积沙细颗粒含量和含泥量高，部分风积沙还含有一定盐分，其影响更为突出。为保证混凝土性能稳定，本条规定采用此类骨料时应进行充分的材料调查与工程适用性验证；当料源、产地或加工工艺发生变化时，骨料品质可能随之改变，故应重新检验与验证。

3.1.3 采用机制砂、再生骨料、细颗粒/含泥砂等材料时，应进行材料调查与适用

性验证；当料源或加工工艺变化、质量波动显著时，应加密检验并重新验证配合比。

3.1.4 高韧性混凝土采用合成纤维作为增韧材料，合成纤维应为单丝纤维或粗纤维。

条文说明

合成纤维在混凝土中通过桥接裂缝、传递应力，抑制裂缝的萌生与发展，是高韧性混凝土的主要增韧材料。《纤维混凝土应用技术规程》（JGJ/T 221）将合成纤维按外形分为单丝纤维和粗纤维：单丝纤维当量直径小、单位体积内纤维根数多，主要抑制混凝土塑性阶段的收缩开裂；粗纤维当量直径大、锚固力强，主要提高硬化混凝土开裂后的承载能力和韧性。本条据此规定高韧性混凝土采用单丝纤维或粗纤维作为增韧材料。

3.1.5 高韧性高耐久性要求可通过纤维增韧、复合胶凝体系、外加剂协同与必要的激发改性措施实现，所用材料应与配合比设计相适配。

3.1.6 高韧性混凝土施工时，应按产品规定用水量拌合，在施工过程中随意加水。

3.2 材料性能

3.2.1 高韧性混凝土的原材料性能应符合以下规定：

1 细骨料应符合 GB/T 14684 规定，使用风积沙时，应通过掺加抗泥型减水剂、激发改性剂改善界面结构，必要时采用与机制砂复配使用（复配比例≥30%），确保拌合物工作性与硬化混凝土性能达标。其中风积沙作为细骨料使用时，粒径宜在 0.075mm~0.6mm，小于 0.075mm 颗粒含量大于 20%，可溶盐含量、有机物含量等指标应满足表 4.2.1-1 要求。当风积沙的某些指标超出限值时，可通过与机制砂复配、使用专用外加剂（如抗泥型减水剂、激发改性剂）等技术手段进行调控，但最终配制的混凝土应满足本标准规定的性能要求。

表 3.2.1-1 细骨料技术要求

项目	技术指标	试验方法
SiO_2（%）	>40	X 射线衍射法
伊利石（%）	≤10.0	
绿泥石（%）	≤10.0	X 射线衍射法
坚固度（%）	≤10.0	JTG E42 T0314/0340
云母含量（按质量计，%）	≤2.0	JTG E42 T0337
硫化物及硫酸盐含量（折算成 SO3，按质量计，%）	≤1.0	GB/T 14685/ JTG E42 T0341
有机物含量（比色法）	合格	JTG E42 T0313/0336
氯离子含量（%）	≤0.06	GB/T 14684

条文说明

风积沙粒径分布窄，颗粒主要集中于 0.6mm～0.075mm 之间，小于 0.075mm 的细颗粒含量高、比表面积大，拌合需水量和外加剂吸附量均大于天然砂，且细颗粒易在水泥石-骨料界面形成薄弱层。表 3.2.1-1 中 SiO_2 含量大于 40%是保证风积沙细颗粒具备潜在火山灰活性的基本条件，使其在激发改性剂作用下可参与水化反应生成胶凝物质；伊利石、绿泥石为黏土矿物，具有吸水膨胀性，对界面强度和体积稳定性有不利影响，故含量均限制为不大于 10.0%；坚固度、云母含量、硫化物及硫酸盐含量、有机物含量和氯离子含量为《建设用砂》（GB/T 14684）等现行标准中对有害杂质和影响耐久性成分的控制指标。掺加抗泥型减水剂可减少细颗粒对减水剂的无效吸附，掺加激发改性剂可活化细颗粒中硅、铝基成分并改善界面结构；当风积沙个别指标超出限值时，与机制砂按不小于 30%的比例复配可优化颗粒级配、降低细颗粒含量。上述调控措施均应以配制的混凝土满足本规程性能要求为前提。

2　机制砂的级配、细度模数、石粉含量、含泥量、泥块含量、有机物含量等应符合现行标准规定，并应通过试验验证满足本文件性能要求。当机制砂石粉含量或粒形导致需水量增大时，应通过胶凝材料用量、砂率与外加剂掺量调整，保证工作性与经时性能满足施工要求。

3　再生骨料应符合现行标准规定，并应重点控制吸水率、含水率及有害杂质含量。再生骨料宜采取预湿、分级配伍或有效用水量修正措施，并通过试验确定外加剂体系与胶凝体系参数。再生骨料混凝土应经试验验证其强度、韧性与耐久性满足本文件 3.2.2、3.2.3 的统一指标要求。

条文说明

再生骨料表面附着老砂浆，吸水率和吸水速率明显高于天然骨料，压碎值波动大，且可能混入砖渣、木屑等有害杂质。再生骨料的高吸水性会消耗拌合用水、降低拌合物工作性并改变有效水胶比，故宜采取预湿、分级配伍或有效用水量修正措施。鉴于再生骨料品质波动对混凝土强度、韧性和耐久性影响显著，本条规定其外加剂体系与胶凝体系参数应通过试验确定，并应按本规程第 3.2.2 条和第 3.2.3 条的统一指标要求验证合格后方可使用。

4　细颗粒/含泥砂应检测含泥量（或细颗粒含量）、泥块含量及需水敏感性当外加剂吸附损失显著时，应选用抗泥型减水剂并通过试验确定掺量。细颗粒/含泥砂混凝土宜配合使用激发改性剂与矿物掺合料，通过分散与活化改善界面结构与孔隙结构，确保满足本文件性能要求。

条文说明

细颗粒/含泥砂中小于 0.075mm 的细颗粒比表面积大，对水和减水剂的吸附性强，是造成拌合物需水量增大、坍落度经时损失快的主要原因；细颗粒在骨料表面形成的黏土膜会削弱水泥石-骨料界面黏结，降低混凝土强度和韧性。抗泥型减水剂分子结构中含有抗吸附基团，可减少细颗粒对减水剂的无效吸附；激发改性剂可激发细颗粒中潜在的硅基、铝基成分参与水化反应，与矿物掺合料共同细化孔隙结构、改善界面过渡区。本条据此规定细颗粒/含泥砂应检测含泥量、泥块含量及需水敏感性，并通过外加剂选型和改性措施保证混凝土性能满足本规程要求。

5　合成纤维的规格、力学性能及物理性能宜分别符合表 3.2.1-2、表 3.2.1-3、表 3.2.1-4 的规定。

表 3.2.1-2　合成纤维的规格

外　形	公称长度（mm）	当量直径（μm）
单丝纤维	4~15	12~50
粗纤维	15~60	>100

表 3.2.1-3　合成纤维的力学性能

项　目	力学性能
抗拉强度（N/mm^2）	≥1200

初始模量（N/mm^2）	≥30.0×103
断裂伸长率（%）	≥7.0
耐碱性能（极限拉力保持率）	≥95%

表 3.2.1-4　合成纤维的物理性能

项目	聚丙烯纤维	聚丙烯粗纤维	聚乙烯醇纤维
截面形状	圆形或异形	圆形或异形	圆形
密度（g/cm^3）	0.90~0.92	0.90~0.93	1.28~1.30
熔点（℃）	160~176	160~176	215~220
吸水率（%）	<0.1	<0.1	<5

条文说明

表 3.2.1-2～表 4.2.1-4 中合成纤维的规格、力学性能和物理性能指标参照《纤维混凝土应用技术规程》（JGJ/T 221）并结合高韧性混凝土增韧要求制定。纤维抗拉强度不小于 1200N/mm2、耐碱性能以极限拉力保持率不小于 95%控制，是保证纤维在混凝土碱性环境中长期发挥增韧作用的基本条件；断裂伸长率不小于 7.0%可使纤维与混凝土基体协调变形，充分发挥桥接增韧作用。纤维公称长度和当量直径影响其在拌合物中的分散性及单位体积内纤维根数，进而影响增韧效果，故按单丝纤维和粗纤维分别作出规定。

6　水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175、《道路硅酸盐水泥》GB/T 13693 的相关规定。

7　骨料应进行级配、含水率与吸水率检测，并将含水率波动纳入计量修正与生产控制。细骨料中有机物、轻物质、云母及其他有害杂质含量应符合《建设用砂》GB/T 14684、JGJ 52 等现行标准规定；必要时应检测可溶盐含量并进行适用性验证。对需水敏感性显著的细骨料，应通过外加剂选型（含抗泥型减水剂）、胶凝体系与改性措施保证拌合物工作性稳定，并满足本文件性能要求。

8　外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119 的规定。

9　高韧性混凝土中宜复合掺用粒化高炉矿渣粉、粉煤灰等矿物掺合料；粉煤灰等级低于 II 级。粉煤灰和粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料应符合现行国家标

准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 和《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的规定。

条文说明

粒化高炉矿渣粉和粉煤灰具有火山灰活性，掺入后可与水泥水化产物 Ca(OH)2 反应生成低钙硅比的水化硅酸钙，细化孔隙结构、降低氯离子扩散系数，并可减少水泥用量、降低水化热，是实现复合胶凝体系的主要材料。粉煤灰等级过低时烧失量和需水量比增大，对拌合物工作性、混凝土强度和耐久性均不利，故本规程规定粉煤灰等级不应低于 II 级。矿物掺合料质量按《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）和《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T 18046）进行控制。

10　激发改性剂物理化学指标应符合表 3.2.1-5 的规定，掺量宜为水泥的 1%~5%。

表 3.2.1-5　激发改性剂物理化学指标

检测项目	指标	试验方法	检测项目	指标	试验方法
MgO	≤10%	GB/T176	氯离子	≤1.0%	JC/T420
f-CaO	≤1.5%	GB/T176	密度	1.2-2.4g/cm3	JTG E30 T0503
SO_3	≤10%	GB/T176	外观	红褐色或黑灰色粉末	-

条文说明

激发改性剂由多种无机物复配组成，主要成分为活性金属氧化物和氢氧化物，可激发风积沙、细颗粒/含泥砂中硅基、铝基成分参与水化反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，增加胶凝物质并改善水泥石-骨料界面结构。表 3.2.1-5 中 MgO、SO3 和 f-CaO 含量直接影响水泥石体积安定性，f-CaO 水化生成 Ca(OH)2 时体积膨胀，含量过高会造成硬化浆体开裂，故分别限定为不大于 10%、10%和 1.5%；氯离子含量限定为不大于 1.0%，以防止钢筋锈蚀；密度指标用于改性剂的进场鉴别和质量稳定性控制。激发改性剂掺量过低时激发效果不明显，过高则可能引起需水量增大和体积稳定性问题，经试验确定以水泥质量的 1%~5%为宜。

11　拌合用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

3.2.2 结构的高韧性混凝土材料主要力学性能指标应满足表 3.2.2 的有关规定。

表 3.2.2 高韧性混凝土的主要力学性能指标

指标类别	标准养护龄期	性能指标		
		I 类	II 类	III 类
等效弯曲韧性（kJ/m^3）	3d	≥200.0	≥120.0	≥60.0
	28d	≥180.0	≥100.0	≥40.0
	60d	≥150.0	≥80.0	≥40.0
等效弯曲强度（N/mm^2）	3d	≥8.0	≥7.0	≥5.5
	28d	≥8.5	≥7.5	≥6.0
	60d	≥9.0	≥8.0	≥6.5
抗折强度（N/mm^2）	3d	≥10.0		
	28d	≥11.0		
	60d	≥12.0		
立方体抗压强度（N/mm^2）	3d	≥20.0		
	28d	≥40.0		
	60d	≥50.0		

注：1 表中性能指标除立方体抗压强度为标准值外，其他性能指标均指代表值，代表值的评定方法应符合本规程附录 B 的有关规定。

2 测试等效弯曲韧性、等效弯曲强度和抗折强度的试件尺寸为 40mm×40mm×160mm；测试立方体抗压强度的标准试件尺寸为 100mm×100mm×100mm，测试结果不再进行尺寸换算折减。

3 表中 60d 的性能指标作为高韧性混凝土最终力学性能评定的指标要求，3d 的力学性能指标作为高韧性混凝土进场检验的力学性能指标要求。

条文说明

普通混凝土仅以抗压强度作为力学性能控制指标，不能反映混凝土开裂后的承载能力和变形能力。高韧性混凝土以等效弯曲韧性、等效弯曲强度和抗折强度表征其韧性水平，辅以立方体抗压强度控制，并按韧性高低分为 I 类、II 类、III 类，以适应桥面铺装、水泥混凝土路面等不同结构部位对韧性的差异化要求。表中 3d 力学性能指标作为进场检验指标，用于控制材料进场质量；考虑矿物掺合料的火山灰反应在后期持续发挥，60d 力学性能指标作为高韧性混凝土最终力学性能评定指标。等效弯曲韧性、等效弯曲强度和抗折强度采用 40mm×40mm×160mm 试件测试，立方体抗压强度采用 100mm×100mm×100mm 试件测试且不再进行尺寸换算折减，与《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T 50081）的有

关规定一致。

3.2.3 高韧性混凝土的耐久性能应满足表 3.2.3 的有关规定，同时应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关规定及设计要求。

表 3.2.3 高韧性混凝土的主要耐久性能指标

指标类别	等级要求	测试依据及测试方法
抗冻试验（快冻法）	≥F300	GB/T 50082，快冻法
抗水渗透试验（逐级加压法）	≥P12	GB/T 50082，逐级加压法
抗氯离子渗透（RCM 法）	≥RCM-IV	GB/T 50082，快速氯离子迁移系数法（RCM 法）
抗硫酸盐侵蚀	≥KS90	GB/T 50082
抗碳化性能	28d 碳化深度≤2.0mm	GB/T 50082

条文说明

道路工程混凝土结构长期暴露于冻融循环、除冰盐、硫酸盐侵蚀和碳化等环境中，耐久性能直接决定结构服役寿命。表 3.2.3 以抗冻等级、抗水渗透等级、氯离子迁移系数（RCM 法）、抗硫酸盐等级和碳化深度作为耐久性控制指标，试验方法均按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082）执行。抗冻等级不低于 F300 适用于寒冷、严寒地区承受冻融循环的道路结构；氯离子迁移系数按 RCM 法分级控制，可有效抑制氯离子侵入引起的钢筋锈蚀；28d 碳化深度不大于 2.0mm 的要求严于普通混凝土，以保证混凝土对钢筋的长期保护能力。

4 混凝土配合比设计

4.0.1 混凝土配合比应根据设计使用年限、环境条件、原材料品质、混凝土强度等级、韧性指标及耐久性要求进行设计，通过计算、试配与验证确定，确保工作性、强度、韧性、耐久性协同优化。混凝土配合比设计应按下列步骤进行：

a）根据混凝土强度等级、韧性指标及耐久性要求，按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定，采用体积法计算初步配合比，初步确定

水胶比、单位用水量、胶凝材料用量、矿物掺合料掺量、砂率及纤维掺量；

b）按初步配合比进行试拌，检测拌合物坍落扩展度、含气量等工作性能，调整外加剂用量和砂率，确定基准配合比；

c）以基准配合比的水胶比为基准，分别增加和减少 0.05 的水胶比配制不少于 3 组混凝土进行强度试验，确定满足配制强度要求的实验室配合比；

d）对实验室配合比进行韧性试验及氯离子扩散系数、抗冻等耐久性验证试验，各项性能均满足本规程要求后，确定为设计配合比；

e）施工前根据现场骨料实测含水率对设计配合比进行换算，确定施工配合比。

条文说明

高韧性高耐久性水泥混凝土配合比设计需同时满足工作性、强度、韧性和耐久性要求，单一指标设计难以保证各项性能协调。本条规定的“计算—试拌—验证”设计流程以《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ 55）的体积法为基础，增加了韧性试验和氯离子扩散系数、抗冻等耐久性验证环节，形成强度、韧性、耐久性多指标协同控制的设计方法。以基准配合比的水胶比为基准分别增加和减少 0.05 配制不少于 3 组混凝土进行强度试验的方法与 JGJ 55 一致；施工前按现场骨料实测含水率换算施工配合比，是保证实际水胶比与设计配合比一致的必要措施。

4.0.2 当混凝土原材料和施工工艺等发生变化时，应重新选定配合比。当施工工艺和环境条件未发生明显变化、原材料的品质在合格的基础上发生波动时，可对混凝土外加剂用量、粗骨料分级比例、砂率进行适当调整，调整后混凝土拌合物性能应与原配合比一致。

4.0.3 道路工程混凝土配合比设计时，混凝土最小胶凝材料用量不宜低于 320 kg/m^3，其中最低水泥用量不宜低于 260kg/m^3。混凝土最大水胶比大于 0.45。

条文说明

水胶比和胶凝材料用量是决定混凝土密实性和耐久性的基本参数。《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T 3310）和《混凝土结构耐久性设计标准》

（GB/T 50476）均对道路混凝土的最大水胶比和最小胶凝材料用量作出了规定。限制最大水胶比可保证硬化浆体密实、毛细孔隙率低，提高混凝土抗冻、抗渗和抗氯离子渗透能力；规定最小胶凝材料用量 320kg/m^{3}和最低水泥用量 260kg/m^3，可保证拌合物具有足够的浆体包裹骨料并形成完整的界面结构。胶凝材料用量过高会增大水化热和自收缩，反而引起混凝土早期开裂，故不宜单纯依靠增加胶凝材料用量提高混凝土性能。

4.0.4 单独采用粉煤灰作为掺合料时，硅酸盐水泥混凝土中粉煤灰掺量超过胶凝材料总量的 35%，普通硅酸盐水泥混凝土中粉煤灰掺量超过胶凝材料总量的 30%。预应力混凝土中粉煤灰掺量不得超过胶凝材料总量的 25%。

条文说明

粉煤灰的火山灰反应依赖水泥水化生成的 $Ca(OH)_2$，早期参与程度低，掺量过大将明显降低混凝土早期强度、延缓强度发展，并降低混凝土的抗碳化能力。本条对粉煤灰最大掺量作出限制：硅酸盐水泥混凝土中为胶凝材料总量的 35%，普通硅酸盐水泥混凝土中为 30%，与《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ 55）的有关规定一致。预应力混凝土对早期强度和钢筋保护能力要求更高，粉煤灰掺量进一步限制为不大于胶凝材料总量的 25%。

4.0.5 采用粒化高炉矿渣粉作为掺合料时，应采用矿渣粉和粉煤灰复合技术。混凝土中掺合料总量超过胶凝材料总量的 50%，矿渣粉掺量大于掺合料总量的 50%。

条文说明

粒化高炉矿渣粉活性较高、对强度贡献大，但单掺时混凝土易泌水、收缩较大；粉煤灰可改善拌合物工作性、降低水化热，但早期强度发展慢。矿渣粉与粉煤灰复合掺用可发挥优势互补效应，使混凝土早期与后期性能协调发展，故本条规定采用粒化高炉矿渣粉作为掺合料时应采用矿渣粉和粉煤灰复合技术。掺合料总量过大时，水泥水化产物不足以激发掺合料活性，混凝土早期强度和抗冻临界强度难以保证，故掺合料总量及矿渣粉占掺合料总量的比例均需控制在本条规定的范围内。

4.0.6 当混凝土结构服役中可能遇到硫酸盐腐蚀环境时，混凝土中应掺加矿渣粉和粉煤灰掺合料，具体掺量应通过试验确定。

4.0.7 理论配合比应计算单方混凝土氯离子含量。钢筋混凝土中由水泥、矿物掺合料、骨料、外加剂和拌合用水等引入的氯离子含量超过胶凝材料总量的 0.10%。预应力混凝土中氯离子含量超过胶凝材料总量的 0.06%。

条文说明

混凝土中氯离子主要来源于水泥、矿物掺合料、骨料、外加剂和拌合用水。氯离子随水侵入混凝土并到达钢筋表面，会破坏钢筋表面钝化膜、引发钢筋锈蚀，是导致混凝土结构耐久性劣化的主要因素之一。本条按《混凝土结构工程施工规范》（GB 50666）的规定，以各原材料引入的氯离子总量占胶凝材料总量的百分比进行控制：钢筋混凝土中不大于 0.10%，预应力混凝土中不大于 0.06%。预应力混凝土控制更严，是由于预应力筋处于高应力状态，对应力腐蚀开裂更为敏感。理论配合比计算单方混凝土氯离子含量，可在材料选定后、施工前预判氯离子超标风险。

4.0.8 理论配合比应计算单方混凝土总碱含量。干燥环境单方混凝土中总碱含量不得大于 3.5kg；潮湿环境单方混凝土中总碱含量不得大于 3.0kg:含碱环境单方混凝土中总碱含量不得大于 2.1kg。混凝土的碱含量是混凝土中原材料的碱含量之和。其中，矿物掺合料的碱含量以其所含可溶性碱量计算，粉煤灰的可溶性碱量取粉煤灰总碱量的 1/6,矿渣粉的可溶性碱量取矿渣粉总碱量的 1/2。

条文说明

混凝土中的碱与活性骨料发生碱骨料反应，生成吸水膨胀的碱硅凝胶，导致混凝土内部膨胀、开裂甚至破坏。反应程度与混凝土总碱含量及环境湿度直接相关：潮湿环境水分充足，反应更易进行；含碱环境外部碱持续侵入，进一步加剧反应。本条按干燥、潮湿、含碱三类环境分别规定单方混凝土总碱含量不大于 3.5kg、3.0kg 和 2.1kg，与《混凝土结构工程施工规范》（GB 50666）的有关规定一致。矿物掺合料中的碱仅部分溶出参与反应，故粉煤灰可溶性碱量取其总碱量的 1/6、矿渣粉可溶性碱量取其总碱量的 1/2 计算。

4.0.9 理论配合比应计算单方混凝土三氧化硫含量。混凝土中三氧化硫含量超过胶凝材料总量的 4.0%。

4.0.10 配制的混凝土除满足抗压强度、抗渗等级等常规设计指标外，还应考虑满足耐久性指标要求，硬化混凝土应进行氯离子扩散系数试验和抗冻试验，并按抗冻试验结果确定抗冻耐久性指数 DF。除有特殊设计要求外，混凝土耐久性指标应满足表 4.0.10 的规定。

表 4.0.10 混凝土耐久性指标

强度等级	氯离子扩散系数（56d）DRkc(X10-12m^2/s)	抗冻性能	抗冻耐久性指数 DF
≥C30	≤5	≥F300	≥60

注：抗冻耐久性指数 DF 按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 规定的快冻法确定，DF=P×N/300×100。式中：P 为经 N 次冻融循环后试件的相对动弹性模量（%）；N 为试件相对动弹性模量降至 60%或质量损失率达 5%时的冻融循环次数，冻融循环达到 300 次试件未破坏时取 N=300。

条文说明

抗压强度、抗渗等级等常规设计指标不能全面反映道路混凝土在氯盐和冻融环境下的长期服役性能。本条增加氯离子扩散系数和抗冻耐久性指数 DF 双指标控制：氯离子扩散系数以 56d 龄期测定，此时混凝土内部结构已基本稳定，测试结果具有代表性，不大于 5×10-12m^2/s 的要求与《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T 3310）对高耐久性混凝土的要求相当；抗冻耐久性指数 DF 按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082）快冻法确定，综合反映规定冻融循环次数后混凝土相对动弹性模量的保持能力，DF 不小于 60 可保证混凝土经受 300 次冻融循环后仍保持完好。

4.0.11 长期处于潮湿或水位变动的寒冷和严寒环境以及盐冻环境的混凝土，应采用引气混凝土。配制的混凝土含气量最低限值应满足表 4.0.11 的规定，最大不宜超过 7.0%。

表 4.0.11 引气混凝含气量最低限值

粗骨料最大公称粒径(mm)	混凝土最小含气量 (%)

	潮湿或水位变动的寒冷和严寒环境	盐冻环境
40.0	4.5	5.0
25.0	5.0	5.5
20.0	5.5	6.0

注:1.表中含气量对于 C50 混凝土可降低 0.5%，对于 C60 混凝土可降低 1.0%，但低于 3.5%。

条文说明

长期处于潮湿或水位变动环境的寒冷、严寒地区以及盐冻地区，混凝土内部水分结冰产生膨胀压力和渗透压力，是混凝土冻融破坏和盐冻剥蚀的主要原因。引气可在混凝土中形成均匀、封闭、稳定的微小气泡，缓冲结冰压力，显著提高混凝土抗冻融和抗盐冻剥蚀能力，故本条要求上述环境中的混凝土采用引气混凝土。含气量要求随粗骨料最大公称粒径减小而提高，是由于粒径减小时砂浆体积含量增大、受冻浆体比例增加，需要更多气泡提供保护。含气量过大会明显降低混凝土强度，故最大含气量限定为 7.0%；C50、C60 混凝土浆体密实，含气量可分别降低 0.5%和 1.0%，但不得低于 3.5%，以兼顾抗冻性能与强度要求。

4.0.12 配合比设计应采用“低水胶比+纤维增韧+复合胶凝体系”技术路线，水胶比宜控制在 0.30~0.38，纤维掺量应根据韧性目标确定（单纤维掺量 0.8%~1.5%，混杂纤维掺量 1.0%~2.0%）。采用风积沙、细颗粒含泥砂等特殊细骨料时，应通过调整砂率（36%~42%）、增加矿物掺合料用量（20%~30%）、优化外加剂复配方案，补偿细颗粒对韧性的不利影响。

条文说明

高韧性高耐久性水泥混凝土的性能通过“低水胶比+纤维增韧+复合胶凝体系”技术路线协同实现。水胶比控制在 0.30～0.38，可保证硬化浆体结构致密、界面过渡区缺陷少，为高耐久性提供基础；纤维掺量根据韧性目标确定，单纤维掺量 0.8%～1.5%、混杂纤维掺量 1.0%~2.0%系依据等效弯曲韧性试验结果确定，掺量过低增韧效果不明显，过高则纤维分散困难、拌合物工作性恶化；复合胶凝体系中矿物掺合料的火山灰反应可改善界面结构、提高后期密实性。风积沙、细颗粒/含泥砂等特殊细骨料的细颗粒含量大、需水量高，通过将砂率调整为 36%～42%、矿物掺合料用量控制为 20%～30%并优化外加剂复配方案，可补偿细颗粒对拌合物工作性和硬化混凝土韧性的不利影响。

4.0.13 冻融环境中高性能混凝土耐久性能应符合表 4.0.13 的规定。

表 4.0.13 冻融环境中高性能混凝土配合比参数

耐久性能要求	设计使用年限、环境类别与作用等级					
	50 年			100 年		
	Ⅱ-C	Ⅱ-D	Ⅱ-E	Ⅱ-C	Ⅱ-D	Ⅱ-E
水胶比	≤0.45	≤0.42	≤0.38	≤0.42	≤0.38	≤0.35
教材用量	≥350 Kg	≥380 Kg	≥400 Kg	≥380 Kg	≥400 Kg	≥420 Kg

条文说明

冻融环境中混凝土的耐久性能与水胶比、胶凝材料用量直接相关。本条按设计使用年限（50 年、100 年）和环境作用等级（Ⅱ-C、Ⅱ-D、Ⅱ-E）分级规定最大水胶比和最小胶凝材料用量，分级原则与《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T 3310）、《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）一致。环境作用等级越高、设计使用年限越长，冻融作用越严酷，故水胶比限值逐级降低、胶凝材料用量逐级提高，以保证混凝土在冻融环境下的长期耐久性能。

5 混凝土质量检验

5.1 原材料检验

5.1.1 原材料应按品种、规格和生产厂家分别标识，贮存于干燥、通风、防尘、防潮、防雨的场所，并应符合 GB/T 31387 规定。

5.1.2 原材料检验应包括以下内容：

a) 厂家、品牌、规格和数量等信息应正确无误；

b) 质量证明文件应齐全；

c) 包装方式和外观质量应符合合同要求。

5.1.3 水泥、掺合料、细骨料、粗骨料、外加剂、纤维等高韧性混凝土原材料进场前均需按照 GB 50164 的规定进行检验及评定。

5.1.4 对于高韧性混凝土拌合物检验，检验项目包括：坍落扩展度、维勃稠度、

征询意见稿

凝结时间、表观密度、含气量、均匀性、抗离析性能绝热升温性能等，应符合 GB/T 50080 的相关规定。在搅拌地点随机采样，每 50 m^3 相同配合比的高韧性混凝土取样少于 1 次。每一工作班相同配合比的高韧性混凝土不足 50 m^3 时，取样少于 1 次。

条文说明

拌合物性能是保证高韧性混凝土施工质量和硬化混凝土性能的前提。坍落扩展度、维勃稠度反映拌合物流动性，含气量直接影响混凝土抗冻性能，凝结时间、表观密度、均匀性和抗离析性能影响施工操作与结构匀质性，检验方法按《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》（GB/T 50080）执行。每拌制 50m^3 同配合比混凝土取样不少于 1 次的频次要求与《混凝土质量控制标准》（GB 50164）一致；每一工作班同配合比混凝土不足 50m3 时仍取样不少于 1 次，以保证各浇筑批次的混凝土均有检验记录可追溯。

5.2 力学性能检验

5.2.1 高韧性混凝土的抗压强度、弹性模量和抗弯拉强度应按 GB/T 50081 的相关规定测试检验。

5.2.2 高韧性混凝土的抗拉性能应按照附录 A 的规定进行测定。

5.2.3 高韧性混凝土的性能检验应符合 GB/T 50107 的相关规定，每组高韧性混凝土试件强度代表值的确定，应符合下列规定：

a) 取 3 个试件强度的算数平均值作为每组试件的强度代表值；

b) 当一组试件中强度的最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15%时，取中间值作为该组试件的强度代表值；

c) 当一组试件中强度的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%时，该组试件的强度作为评定的依据。

条文说明

本条取值规则与《混凝土强度检验评定标准》（GB/T 50107）的有关规定一致。以 3 个试件强度的算术平均值作为该组试件的强度代表值，可减小偶然误差

的影响；当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的15%时，离群值已不能代表该组混凝土强度，故取中间值作为强度代表值；当最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的15%时，该组试件离散性过大，试验结果不应作为评定依据，应分析原因后重新检验。

5.3 耐久性能检验

5.3.1 冻融环境中高性能混凝土耐久性能应符合表5.3.1-4的规定。

表5.3.1-4 冻融环境中高性能混凝土耐久性能要求

耐久性能要求	设计使用年限、环境类别与作用等级					
	50年			100年		
	Ⅱ-C	Ⅱ-D	Ⅱ-E	Ⅱ-C	Ⅱ-D	Ⅱ-E
抗冻等级	≥F250	≥F300	≥F350	≥F250	≥F300	≥F350

条文说明

本条按设计使用年限和环境作用等级规定冻融环境中高性能混凝土的抗冻等级要求，与本规程第4.0.13条的配合比参数规定配套执行。抗冻等级按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082）规定的快冻法评定；环境作用等级越高，冻融作用越严酷，抗冻等级要求相应提高，以保证混凝土在设计使用年限内经受冻融循环而不发生明显损伤。

5.4 检验要求

5.4.1 施工前应对所使用的混凝土原材料质量进行检验，检验内容包括:产品合格证、出厂检验报告和型式检验报告。混凝土搅拌站(包括预制构件企业) 应按照混凝土工作性要求、混凝土强度等级、抗渗等级和耐久性要求分别进行混凝土配合比设计。混凝土配合比首次开盘时监理单位应进行旁站。

5.4.2 混凝土原材料首次进场时或每半年应进行一次型式检验。施工过程中混凝土搅拌站 (包括预制构件企业) 应对原材料进行进场检验。进场检验项目和检验频次应符合表5.4.2的要求。应对水泥、粉煤灰、矿渣粉、骨料和外加剂进行见证试验。对再生骨料、细颗粒/含泥砂等质量波动较大的材料，宜在表5.4.2规定基础上加密进场检验；加密原则可按同等条件下检验频次加倍执行。

表 5.4.2 原材料进场检验项目及检验频次

原材料名称	检验项目	检验频次
水泥	比表面积、凝结时间、安定性、强度	1.同厂家、同编号、同品种、同强度等级、同出厂日期的散装水泥每500t(袋装水泥 200t)检验 1 次，当不足上述数量时，也需检验 1 次; 2.出厂日期达 3 个月检验 1 次。
粉煤灰	细度、烧失量、需水量比	同厂家、同编号、同品种、同出厂日期的产品每 200t 检验 1 次，不足 200t 也需检验 1 次。 连续供应同厂家、同规格的细骨料 400m(或 600t)检验 1 次,不足 400m(或 600t)时也需检验 1 次。
矿渣粉	烧失量、比表面积、流动度比、活性指数	同厂家、同编号、同品种、同出厂日期的产品每 200t 检验 1 次，不足 200t 也需检验 1 次; 出厂日期达 3 个月检验 1 次。
外加剂	减水率、含气量、泌水率比、凝结时间差、坍落度或含气量 1h 经时变化量、抗压强度比	同厂家、同编号、同品种、同出厂日期的产品每 50t 检验 1 次，不足 50t 也需检验 1 次
粗骨料	颗粒级配、紧密空隙率、压碎值指标、针、片状颗粒含量、含泥量、泥块含量	连续供应同厂家、同规格的粗骨料 400m(或 600t)检验 1 次,不足 400m(或 600t)也需检验 1 次
细骨料	筛分、细度模数、含泥量(石粉含量)、泥块含量、云母含量、轻物质含量、有机物含量、压碎值 指标	连续供应同厂家、同规格的细骨料 400m(或 600t)检验 1 次,不足 400m(或 600t)时也需检验 1 次

注:带’项目表示采用非天然砂时需要进行检验的项目。

条文说明

原材料质量稳定是混凝土质量稳定的基础。表 5.4.2 中水泥、粉煤灰、矿渣粉、外加剂、粗细骨料的检验项目和检验频次按《混凝土质量控制标准》(GB 50164)的有关规定确定，以同厂家、同品种、同规格的连续供应批量作为检验批次单位。再生骨料、细颗粒/含泥砂等质量波动较大的材料，其品质受料源和加工工艺影响显著，按常规频次检验难以及时发现质量波动，故宜在表 6.4.2 规定的基础上加密进场检验，加密原则可按同等条件下检验频次加倍执行。

5.4.3 混凝土施工过程中，应按表 5.4.3 的要求对混凝土拌合物性能进行检验，检验结果应满足设计、施工以及经批准的施工配合比的要求。

表 5.4.3 凝合物性能检验项目及检验批次

检验项目	检验批次

坍落度	每拌制 50m³ 混凝土或每工作班至少取样检验 1 次
含气量	
入模温度	每工作班至少测试 3 次
泌水率	每工作班至少取样检验 1 次

5.4.4 混凝土施工过程中，应根据设计、施工和相关专业标准要求，对混凝土的力学性能进行检验，检验结果应满足设计和施工要求。

5.4.5 施工过程中应对结构混凝土进行耐久性能检验。除有特殊耐久性设计要求的混凝土外，施工单位检验项目和检验频率应满足表 5.4.4 的规定。

表 5.4.4 混凝土耐久性检验批次

检验项	检验频次
氯离子扩散系数	每拌制 5000m3 混凝土或同施工标段、同施工工艺同配合比混凝土至少检验一次。
抗冻等级有设计要求时)	每拌制 20000m3 混凝土或同施工标段、同施工工艺司配合比混凝土至少检验一次。

条文说明

施工过程中对结构混凝土进行耐久性能检验，是保证耐久性设计指标落实到实体的关键环节。表 5.4.4 以氯离子扩散系数和抗冻等级作为耐久性检验项目，检验频次按拌制方量与同施工标段、同施工工艺、同配合比双控确定：氯离子扩散系数每拌制 5000m³ 检验一次，抗冻等级（有设计要求时）每拌制 20000m³ 检验一次，兼顾了检验代表性与工程经济性，与《混凝土质量控制标准》（GB 50164）的有关规定一致。

5.4.6 混凝土的耐久性的检测方法、试验取样和试件留置应满足《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)的要求。

5.4.7 见证取样和送检的比例不得低于施工单位应取样数量的 30%。

条文说明

监理见证取样和送检是保证检验数据真实性、公正性的重要措施。本条规定见证取样和送检比例不得低于施工单位应取样数量的 30%，与《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204）的有关规定一致。

5.4.8 施工过程中，混凝土强度等级、抗渗等级和耐久性能的检验试件，应在混凝土浇注地点随机抽取，同一批试件应从同一盘混凝土或同一罐车的混凝土中取出。

5.4.9 混凝土实体质量检验内容包括:外观质量检验、钢筋保护层厚度检验、强度检验和渗透性能检验。外观质量检验钢筋保护层厚度检验和强度检验应满足国家相关标准的要求。实体渗透性能检验应在不影响结构安全的情况下，选择有代表性的结构部位取芯进行氯离子扩散系数检验。预制混凝土构件或预应力混凝土构件可采用同条件养护试件代替。

条文说明

实体渗透性能检验通过在结构代表性部位钻取芯样进行氯离子扩散系数检验，直接反映结构混凝土的实际抗氯离子渗透能力，较标准养护试件检验更接近结构真实状态。取芯可能对结构安全产生影响，故应在不影响结构安全的情况下选择有代表性的部位；预制混凝土构件或预应力混凝土构件取芯受限时，可采用同条件养护试件代替，同条件养护试件与实体混凝土经历相同的温湿度历程，其检验结果可反映实体质量。

征询意见稿

附录 A 高韧性混凝土弯曲韧性试验方法

A.0.1 本试验方法适用于高韧性混凝土弯曲韧性的测定。

A.0.2 试验装置（图 A.0.2）应符合下列规定：

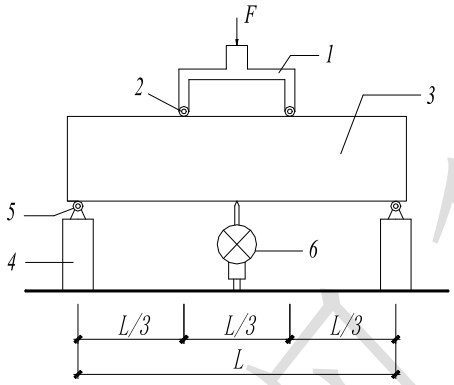


图 A.0.2 抗弯试验加载装置

1——加载分配梁；2——分配梁辊轴；3——试件；4——支座；5——支座辊轴；6——位移计

1 试验机宜采用液压伺服万能试验机或带有弯曲试验台的伺服式压力试验机，示值相对误差不大于 1.0%，试验时的最大荷载宜在量程的 80%以内。

2 加载分配梁，试验机自带或者专门制作，分配梁中点为加载点，在试件标距三分点处设有两个加压辊轴，辊轴直径 10mm~12mm。

3 与试件接触的两个辊轴铰支座，辊轴弧形直径 10mm~12mm，支座长度比试件宽度长 10mm。

4 挠度测量装置应符合图 A.0.2 的要求，并应包括固定测量挠度仪表的支座；挠度测试系统包括电阻位移计或者 LVDT 位移计以及配套的电测信号放大器，量程不小于 20mm，分度值低于 0.001mm，测试点位于试件底部跨中位置。

5 荷载测量传感器应准确测量施加于试件上的荷载，测量精度低于 0.1kN。

6 测试数据采集应连续自动完成，可通过模数转换器与计算机连接，有程

征询意见稿

序控制，采样频率不宜低于 10Hz。

7 其他：钢直尺、游标卡尺、直角规等。

A.0.3 试件成型及养护方法参照现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的有关规定。每组试验至少应制备 3 个试件。

A.0.4 试件尺寸为 40mm×40mm×160mm，试验跨度取 L=150mm。

A.0.5 试验测试应按下列步骤进行：

1 从养护地点取出试件，擦净后检查外观，不得有明显缺损，在跨中 *l*/3 的纯弯段内不得有直径大于 5mm、深度大于 2mm 的表面缺陷。

2 将试件成型时的浇筑面作为承荷面，安放在支座上。按图 A.0.2 规定尺寸和三分点位置加荷的规定，检查支座及分配梁位置，所有间距尺寸偏差大于±1mm。

3 试件放稳对中后启动试验机，当分配梁辊轴与试件接近时，调整分配梁和支座，使接触均衡。压头及支座不能前后倾斜，各接触不良处应予以垫平。

4 试件安放好后，施加一定的预压荷载，停机检查试件与压头及支座的接触情况，确保试件不发生扭动，然后安装测量跨中挠度的位移计。

5 安装测量变形的仪表时首先接通测试线路并作空载调试，然后做预压调试，待测试系统工作正常后方可进行正式试验。

6 对试件按位移控制加荷，加载应连续、均匀，加载速率取 0.2mm/min。

7 绘制荷载-挠度曲线。

征询意见稿

若试件在受拉面跨度三分点以外断裂，则该试件试验结果无效。

A.0.6 试件的等效弯曲强度 f_{eq}^{u} 按下式计算（图 A.0.6）：

$$f_{eq}^{u}=\frac{\Omega_u L}{bh^2\delta_u} \tag{A.0.6}$$

式中：f_{eq}^{u}——等效弯曲强度（N/mm²），精确至 0.1 N/mm²；

Ω_u——跨中挠度为 δ_u 时荷载-挠度曲线下的面积（N·mm）；

δ_u——荷载下降至峰值荷载的 u 倍时对应的挠度值（mm）。用于高韧性混凝土力学性能指标测定时，u 取 0.85；

b、h——试件的截面宽度和高度（mm）；

L——试件的跨度（mm）。

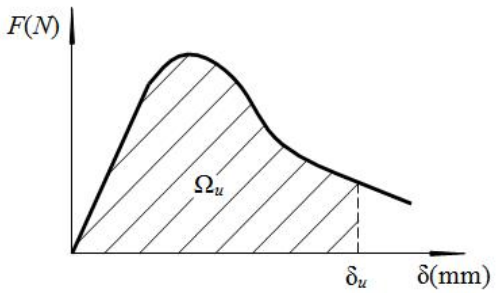


图 A.0.6 等效弯曲强度计算

A.0.7 试件的等效弯曲韧性按下式计算：

$$W_e^{u}=\frac{\Omega_u}{bh^2} \tag{A.0.7}$$

式中：W_e^{u}——等效弯曲韧性（kJ/m³），精确至 0.1kJ/m³。

附录 B 高韧性混凝土力学性能快速检验评定方法

B.0.1 本方法适用于高韧性混凝土力学性能的快速检验。

B.0.2 试验装置应符合下列规定：

1 可程式恒温恒湿试验箱，可调节温度范围不小于 0℃~80℃，温度均匀度为±1℃，温度波动度为±0.5℃；湿度范围不小于 20%~98%R.H，湿度均匀度为±2%R.H，湿度波动度为±1%R.H。

2 可编程式恒温恒湿试验箱的升温速率大于等于 3℃/min，降温速率大于等于 1℃/min。

3 高韧性混凝土力学性能的快速检验对应的可程式恒温恒湿试验箱运行程序应符合图 B.0.2 的规定。

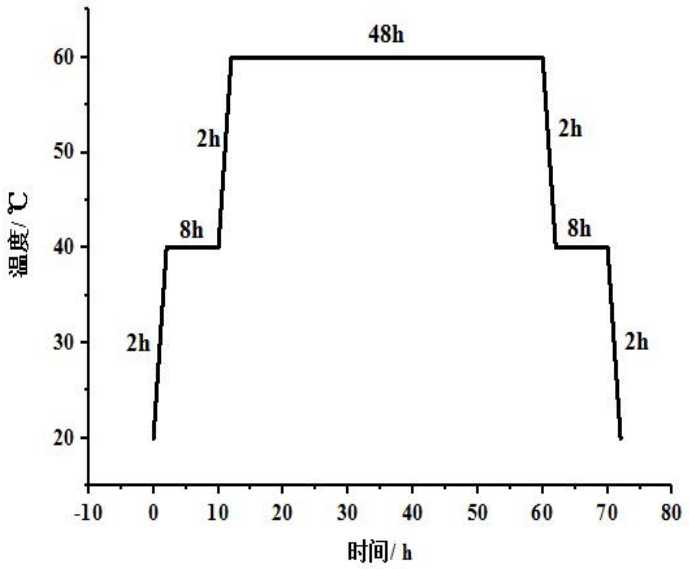


图 B.0.2 可程式恒温恒湿试验箱运行程序

4 高韧性混凝土力学性能快速检验用试件的尺寸、制作与养护应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定；等效弯曲强度与等效弯曲韧性试验应符合本规程附录 A 的规定。每批次应制作三组试件。试件成型 24 h 后拆模并检查外观，不得有明显缺损。试件拆模后置于可程式恒温恒湿试验箱中，上下错位放置，按图 B.0.2 的运行程序养护 72h 后取出，置于

室温环境下放置至温度稳定后进行力学性能测试。

B.0.3 快速检验的高韧性混凝土力学性能测试结果与本规程表 4.2.2 中对应 60d 标准养护的力学性能指标的比值应满足表 B.0.3 的要求，此时可评定高韧性混凝土相应的力学性能合格。

表 B.0.3 高韧性混凝土快速养护力学性能评定指标

力学性能指标类别	快速检验/标准养护		
	I 类	II 类	III 类
等效弯曲韧性（N·mm）	≥150.0	≥80.0	≥40.0
等效弯曲强度 (N/mm^2)	≥8.1	≥7.2	≥5.9
抗折强度(N/mm^2)	≥10.8		
立方体抗压强度 (N/mm^2)	≥42.5		

注：表中性能指标除立方体抗压强度为标准值外，其他性能指标均指代表值。

征询意见稿

附录 C 高韧性混凝土力学性能现场检验评定方法

C.1 等效弯曲强度和等效弯曲韧性

C.1.1 本方法适用于高韧性混凝土抗折强度、等效弯曲强度和等效弯曲韧性的现场取样测试和评定。

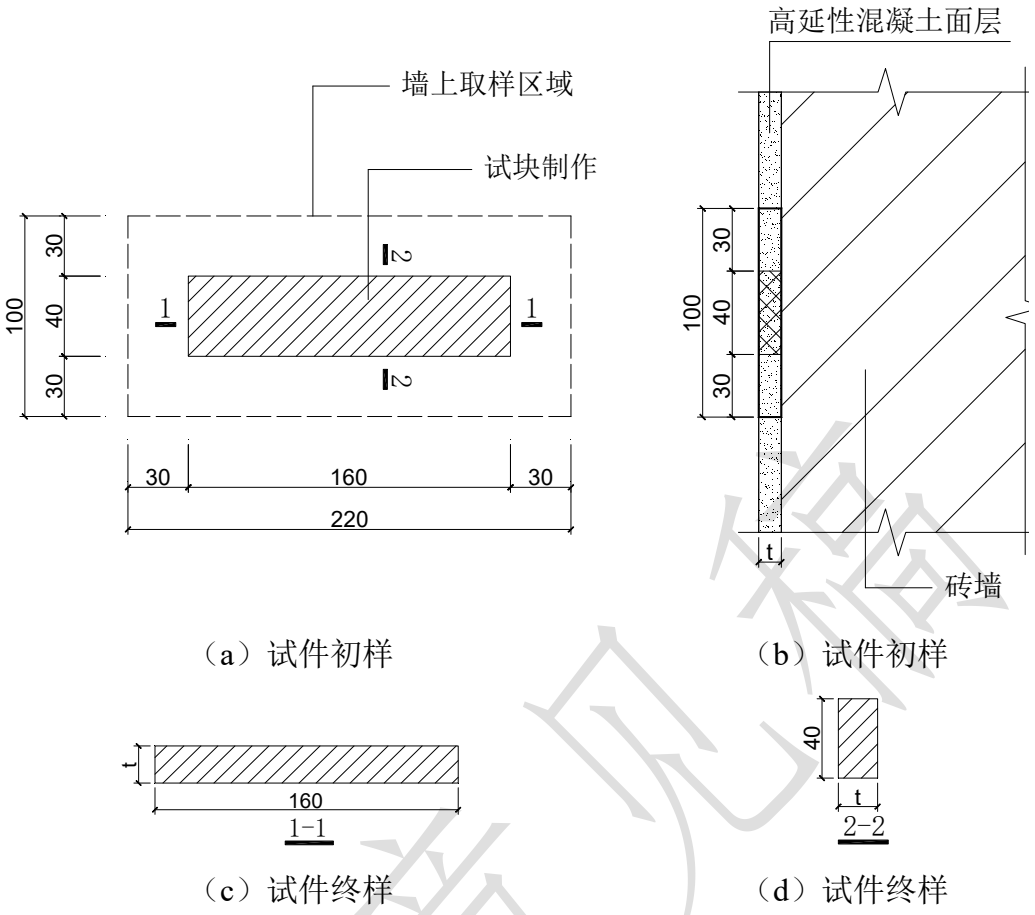
C.1.2 高韧性混凝土的抗折强度、等效弯曲强度和等效弯曲韧性的现场取样应符合以下规定：

1 取样应按批次进行，每批次抗折试验和抗弯试验应分别选择不少于 3 面墙进行随机取样，每片墙取样点不少于 2 个，抗折试验和抗弯试验总取样数量均少于 6 个。

2 取样应先按图 C.1.2（a）、图 C.1.2（b）的要求从墙上切取试件初样，并按图 C.1.2（c）、图 C.1.2（d）所示尺寸要求切取试件终样，试件终样的厚度 t 为高韧性混凝土面层厚度。

3 试件终样制作时，应保证切面平整、光滑，试件终样的尺寸偏差不宜大于 2mm。

4 试件抗折试验应按现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》GB/T 17671 的有关规定进行测试；试件等效弯曲强度和等效弯曲韧性检验应按本规程附录 A 的方法测试测试。



（a）试件初样　　（b）试件初样

（c）试件终样　　（d）试件终样

图 C.1.2　墙上取样示意图

C.1.3　高韧性混凝土现场取样的测试数据中异常数据判别和处理应符合现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784-2013 中附录 B 的有关规定执行。

C.1.4　高韧性混凝土现场取样测试结果评定应符合下列规定。

1　高韧性混凝土的抗折强度和等效弯曲强度测试结果，剔除异常值后的平均值应符合下列规定：

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{t_0} x_i}{t_0} \geqslant [x] \qquad \text{（C.1.4-1）}$$

式中：$\overline{x}$ ——测试平均值；

x_i ——第 i 个测试值；

t_0——剔除异常值后的测试数量；

$[x]$——本规程表 4.2.2 中的等效弯曲强度、等效弯曲韧性指标。

2 高韧性混凝土的等效弯曲韧性测试结果，剔除异常值后的平均值应符合下列规定：

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{t_0} x_i}{t_0} \geqslant 0.70[x] \qquad \text{（C.1.4-2）}$$

C.2 回弹法检测高韧性混凝土抗压强度

C.2.1 本节适用于养护龄期为 28d~60d、抗压强度为 40MPa~65MPa 的高韧性混凝土抗压强度的回弹检测。

C.2.2 检测仪器和检测方法应符合下列规定：

1 回弹仪的技术要求、检定和保养应满足现行国家标准《回弹仪》GB/T 9138 和现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23 的有关规定。

2 采用回弹仪检测高韧性混凝土抗压强度的测试方法应符合现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23 的有关规定，回弹仪的轴线应垂直于高韧性混凝土加固面层。

C.2.3 回弹值的计算应符合现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23 的有关规定。

C.2.4 高韧性混凝土测区抗压强度采用式 C.2.4 的测强曲线方程进行计算。

$$f_{du,e} = 0.0047 R_m^{2.5133} \qquad \text{（C.2.4）}$$

式中：$f_{du,e}$——高韧性混凝土测区的抗压强度推定值；

R_m——高韧性混凝土测区的平均回弹值。

C.2.5 构件或混凝土检验批的高韧性混凝土抗压强度计算，应符合现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23 的有关规定。

C.3 高韧性混凝土现场薄板抗弯试验

C.3.1 本节适用于现场测试和评定高韧性混凝土的薄板抗弯性能。

C.3.2 试验装置应符合下列规定：

1 采用现场堆载的加载方式进行测试，加载示意图如图 C.3.2 所示。

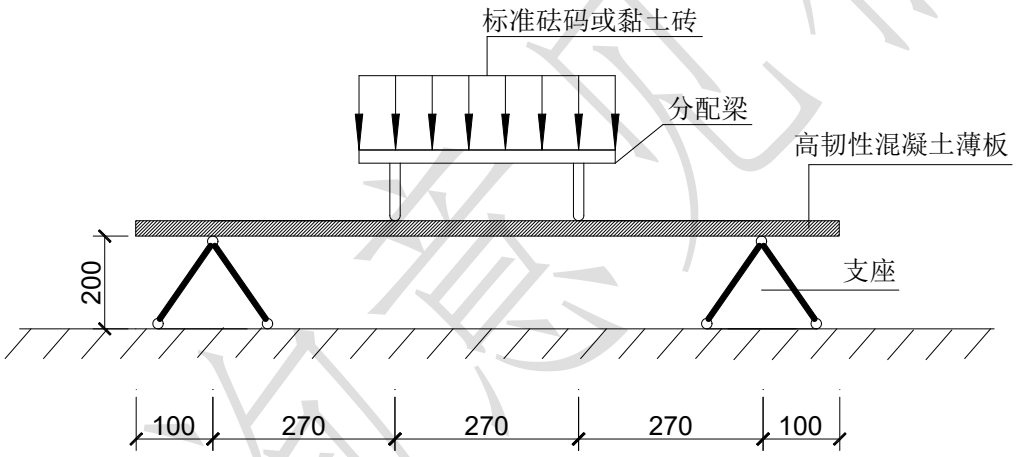


图 C.3.2 加载装置示意图

2 支座高度不小于 200mm。

3 堆载用的配重块选用砝码或标准粘土砖，配重块应均匀分布于分配梁上。若选用砝码，应采用国标 M1 级、重量为 1kg 的砝码；若采用标准砖，应选择尺寸接近、重量误差较小的标准粘土砖。

4 若配重块采用标准黏土砖，应在加载结束后，称量标准砖的总重量，称量误差为±5g。

5 采用钢直尺或钢卷尺测量弯板跨中板底的最大挠度。

征询意见稿

C.3.3 试件制作尺寸、养护方式和养护龄期应符合下列规定：

1 高韧性混凝土薄板尺寸：长×宽×厚=1000mm×150mm×15mm。

2 薄板宽度和厚度的尺寸误差为±1mm。

3 高韧性混凝土薄板应采用浸水养护，试件制作成型 24h 后放入水中养护，水温控制在 25±5℃。高韧性混凝土薄板的测试龄期为 7d。

C.3.4 试验测试应按下列步骤进行：

1 高韧性混凝土达到养护龄期后，从水中取出，并在阴凉通风处晾干不小于 4h。

2 支座应摆放在坚硬、平整、水平的地面上。支座按图 C.3.2 所示放置，间距为 810mm，支点间距的误差不大于 1mm。

3 两个加载点位于制作间距三等分处，配重块位于分配梁上，放置配重块时应从中间向两边均匀、对称放置。

4 试验过程中，每放置一块配重块，读取一次挠度值，读数精度不低于 0.1mm。

C.3.5 高韧性混凝土抗弯试验的结果评定应同时符合下列规定：

1 配重块的累计重量不小于 25kg。

2 最大跨中挠度值不小于 120mm。

征询意见稿

附录 D 高韧性混凝土氯离子扩散系数试验方法

D.1 范围

本方法规定了采用快速氯离子迁移系数法（RCM 法）测定氯离子在道路工程高韧性高耐久性水泥混凝土（以风积沙为主要细骨料）中非稳态电迁移扩散系数的试验方法，用于评价高韧性混凝土抗氯离子渗透性能。

D.2 原理

在外加直流电场作用下，氯离子在混凝土试件中发生定向迁移。试验结束后通过硝酸银（$AgNO_3$）显色法测定氯离子迁移深度，结合电压、时间与试验温度计算氯离子迁移系数（扩散系数）。

D.3 试件尺寸和数量

D.3.1 试件尺寸：宜采用直径 100mm±1mm、高度 50mm±2mm 的圆柱体试件。当需要提高氯离子渗透深度时，可采用直径 100mm±1mm、高度 30mm±1mm 的圆柱体试件。

D.3.2 试件数量：每组试件数量为 3 块。

D.3.3 试件成型时应使用不含纤维的超高性能混凝土拌合物。

D.4 试验所用仪器设备、溶液和指示剂

试验所用仪器设备、溶液和指示剂应符合 GD/T 50082 的有关规定，其中 RCM 装置的电源应能稳定提供 0V~90V 的可调直流电。

D.5 试件制备

征询意见稿

D.5.1 试件成型与养护应符合 GB/T 50082 的规定。试验室制作试件时宜采用Ø100mm×200mm 试模。

D.5.2 自然养护类超高性能混凝土试件应在抗氯离子渗透性能试验前 7d 加工成标准尺寸的试件，热养护类超高性能混凝土试件应在标准蒸汽养护结束时加工成标准尺寸试件。应先将试件从正中间切成Ø100mm×100mm 相同尺寸的两部分,然后从两部分各切取一个目标高度的圆柱体试件，并应将第一次的切口面作为暴露于氯离子溶液中的测试面。

D.5.3 试件加工后应采用 200 号~600 号的水砂纸和细锉刀打磨光滑，加工好的试件应按相应的养护制度继续养护至试验龄期。

D.6 试验步骤

D.6.1 RCM 法试验应按下述步骤进行

a） 首先应将试件从养护池中取出，并将试件表面的碎屑刷洗干净,擦干试件表面多余的水分。然后应采用游标卡尺测量试件的直径和高度，测量应精确到0.1mm。应将试件在饱和面干状态下置于真空容器中进行真空处理。应在 5min 内将真空容器中的气压减少至 1kPa~5kPa,并应保持该真空度 3h,然后在真空泵仍然运转的情况下，将用蒸馏水配制的饱和氢氧化钙溶液注入容器，溶液高度应保证将试件浸没。在试件浸没 1h 后恢复常压，并应继续浸泡 18h±2h。

b） 试件安装在 RCM 试验装置前应采用电吹风冷风挡吹干，表面应干净，无油污、灰砂和水珠。

c） RCM 试验装置的试验槽在试验前应用室温凉开水冲洗干净。

d） 试件和 RCM 试验装置准备好以后,应将试件装入橡胶套内的底部，应

在与试件齐高的橡胶套外侧安装两个不锈钢环箍(图 B.1)，每个箍高度应为 20mm，并应拧紧环箍上的螺栓至扭矩 30N·m±2N·m，使试件的圆柱侧面处于密封状态。

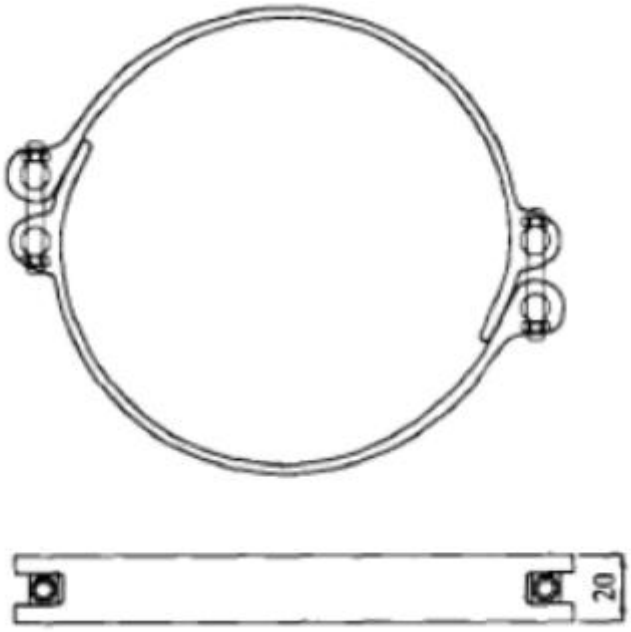


图 D.1 不锈钢环箍

e） 应将装有试件的橡胶套安装到试验槽中，并安装好阳极板。然后应在橡胶套中注入约 300mL 浓度为 0.3mol/L 的 NaOH 溶液，并应使阳极板和试件表面均浸没于溶液中。应在阴极试验槽中注入 12L 质量浓度为 10%的 NaCl 溶液，并应使其液面与橡胶套中的 NaOH 溶液的液面齐平。

f） 试件安装完成后，应将电源的阳极（又称正极）用导线连至橡胶桶中阳极板，并将阴极（又称负极）用导线连至试验槽中的阴极板。

D.6.2 电迁移试验应按下列步骤进行。

a） 首先应打开电源，将电压调整到 30V±0.2V，并应记录通过每个试件的初始电流。

b） 后续试验应施加的电压（表 D.1 第二列）应根据施加 30V 电压时测量得到的初始电流值所处的范围（表 D.1 第一列）决定。应根据实际施加的电压，

记录新的初始电流。应按照新的初始电流值所处的范围（表 D.1 第三列），确定试验应持续的时间（表 D.1 第四列）。

表 D.1 初始电流、电压与试验时间的关系

初始电流I_0（用 30V 电压）/ mA	施加的电压 U（调整后）/V	可能的新初始电流 I_0'/mA	试验持续时间 t/h
I_0<2.5	90	5≤I_0'<10	168
2.5≤I_0<5	60	5≤I_0'<10	96
5≤I_0<10	60	10≤I_0'<20	48
I_0≥10	60	I_0'≥20	24

c） 应采用温度计或热电偶测温装置记录各试件阳极溶液的初始温度，读数应精确至 0.1 ℃。

d） 试验结束时，应记录各试件阳极溶液的最终温度，并记录各试件对应的最终电流。

e） 试验结束后应及时排放试验溶液；应用黄铜刷清除试验槽内结垢或沉淀物，并用饮用水及洗涤剂将试验槽与橡胶套冲洗干净；冲洗后应用电吹风冷风挡吹干备用。

D.6.3 氯离子渗透深度测定应按下列步骤进行

a） 试验结束后，应立即断开电源，并确认各试验回路已断电。

b） 断电后，应将试件从橡胶套中取出，立即用自来水冲洗试件表面，清除残留溶液；随后擦去试件表面多余水分。

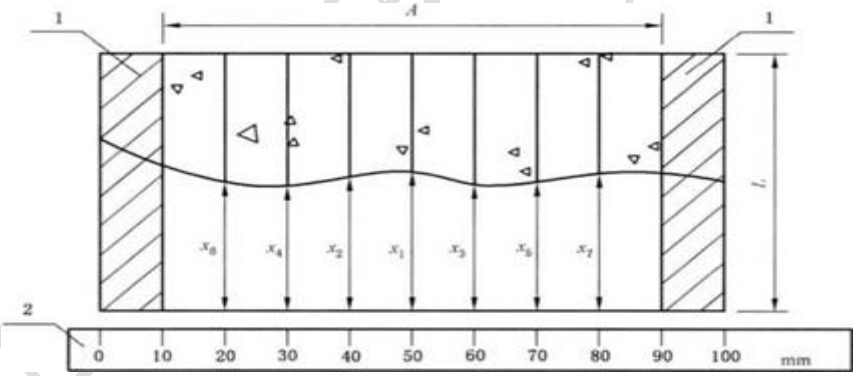
c） 冲洗后，应在压力试验机上沿试件轴线方向劈裂为两个半圆柱体；并应在劈裂断面立即均匀喷涂浓度为 0.1mol/L 的 $AgNO_3$溶液作为显色指示剂。

d） 喷涂后静置约 15min，应待显色边界清晰后，沿试件直径方向在断面上划分 10 个等距测点（或 10 等分），并用细防水笔描绘显色分界线（渗透轮廓线）。

e） 应根据显色分界线的明显颜色变化，采用游标卡尺测量各测点处显色分界线至试件受氯离子作用面的距离（见图 D.2），读数精确至 0.1mm。

f） 当某一测点被粗骨料阻挡导致无法准确判读时，可将测点沿分界线方向平移至最近且未被骨料阻挡的位置进行测量；当个别测点仍无法获得数据时，在有效测点数不少于 5 个的前提下，可忽略该测点数据，并在记录中注明。

g） 当某测点处存在明显缺陷（如孔洞、裂缝或局部剥落）导致测得渗透深度显著偏大时，可判为异常值并予以剔除；异常情况及处理理由应在试验记录和报告中注明。



标引序号说明：

1——试件边缘部分；

2——尺子；

A——测量范围；

L——试件高度。

图 D.2 显色分界线位置编号

D.7 试验结果计算及处理

D.7.1 高韧性沙混凝土的氯离子扩散系数应按式（D.1）进行计算：

$$D_{RCM}=\frac{0.0239\times(273+T)L}{(U-2)t}\left(X_d-0.0238\sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}}\right) \qquad (D.1)$$

式中：

D_{RCM}———高韧性沙混凝土的氯离子扩散系数，精确到 $0.01\times10^{-12}m^2/s$；

U———所用电压的绝对值，单位为伏特（（V）；

T———阳极溶液初始温度和结束温度的平均值，单位为摄氏度（℃）；

L———试件厚度，单位为毫米（mm），精确到 0.1mm；

X_d———氯离子渗透深度的平均值，单位为毫米（mm），精确到 0.1mm；

t———试验持续时间们单位为小时（h）。

D.7.2 高韧性混凝土的氯离子扩散系数应符合以下规定。

a） 计算 3 个试件氯离子扩散系数的算术平均值。

b） 当氯离子扩散系数的计算平均值小于 $0.10\times10^{-12}m^2/s$ 时，直接取 3 个试件氯离子扩散系数的中间值作为该组试件的氯离子扩散系数测定值。

c） 当氯离子扩散系数的计算平均值介于 $0.10\times10^{-12}m^2/s$~$0.40\times10^{-12}m^2/s$ 之间时，若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 30%，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；若最大值和最小值均超过中间值的 30%，应取中间值作为测定值。

d） 当氯离子扩散系数的计算平均值大于 $0.40\times10^{-12}m^2/s$ 时，若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15%，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；若最大值和最小值均超过中间值的 15%，应重新制样进行试验，或取其中最大值作为测定值。

征询意见稿

附录 E 抗拉性能试验试验

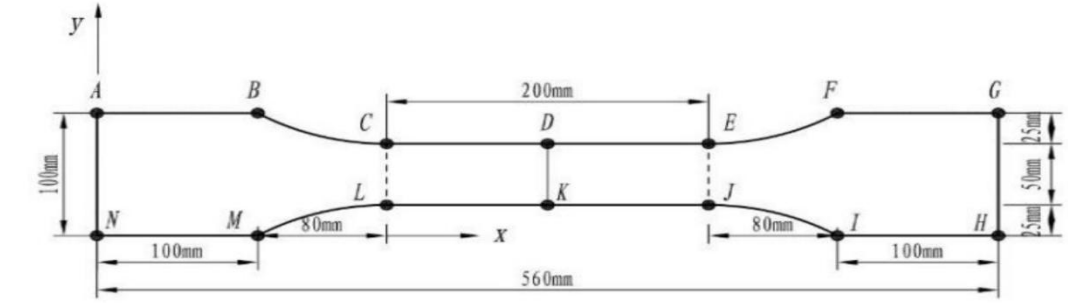
E.1 范围

本试验方法适用于测定高韧性混凝土在单轴拉伸试验条件下的弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变，以评价其抗拉性能。

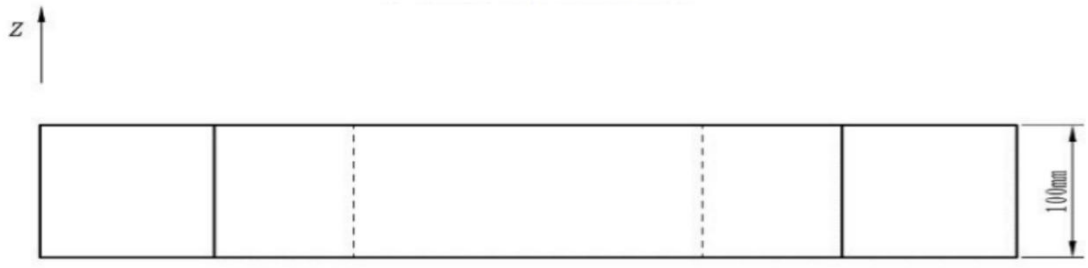
E.2 试件尺寸和数量

E.2.1 抗拉性能测试试件尺寸如图 A.1 所示，其中 B-C 弧段由包括点 B、点 C 在内的 21 个点连接而成的 20 条线段组成，每个点的坐标见表 A.1，F-E、I-J、M-L 弧段构成与 B-C 弧段相同。A.2.2 抗拉性能试件厚度分为 100m 和 30 两种，供需双方可根据需要选择合适厚度的抗拉性能试件。当高韧性混凝土中纤维长度不大于 13mm 且不含粗骨料时，宜采用厚度为 30m 的试件;当高韧性混凝土中纤维长度大于 13mm 或含有粗骨料时，宜采用厚度为 100m 的试件。不同厚度试件的测试结果在进行合格评定时不考虑尺寸效应。

E.2.3 每组试件数量为 6 个。



a) 试件俯视图



b) 试件正视图

图 E.1 抗拉性能测试试件尺寸示意图

表 E.1B-C 弧段内各点连接坐标

点	1（B点）	2	3	4	5	6	7
X/mm	100.0	104.0	108.0	112.0	116.0	120.0	124.0
Y/mm	100.0	94.4	90.0	86.6	84.0	81.9	80.4
点	8	9	10	11	12	13	14
X/mm	128.0	132.0	136.0	140.0	144.0	148.0	152.0
Y/mm	79.1	78.2	77.4	76.8	76.4	76.0	75.8
点	15	16	17	18	19	20	21（点C）
X/mm	156.0	160.0	164.0	168.0	172.0	176.0	180.0
Y/mm	75.6	75.4	75.3	75.2	75.1	75.0	75.0

E.3 试验仪器

E.3.1 拉力试验机应符合下列规定:

a)试件破坏荷载宜大于拉力机最大量程的 20.0%且宜小于拉力机最大量程的 80.0%;b)示值相对误差应为士 1.0%;拉力机应具有加载速率指示装置或加载速度控制装置，并应能均匀连续的加载;c)拉力机拉伸间距小于 800mmn;其他要求应符合 GB/T 3159 和 GB/T 2611 的有关规定。

E.3.2 用于应变测量的仪器装置应符合下列规定:

a)用于应变测量的仪器应采用位移传感器，也可以采用激光传感器和引伸计。采用位移传感器时应备有用于微变形测量的固定骨架，试件的变形通过微变形固定骨架传递到位移传感器。采用位移传感器测量试件应变时，应备有数据自动采集系统;条件认可时，采用位移和荷载数据同步采集系统;

b)采用位移传感器时，其测量精度应为 0.001mm;采用激光传感器和引伸计时，其测量精度应为士 0.001%;

c)应变测量的标距宜为 200 mm。

E.4 试验步骤

E.4.1 每种高韧性混凝土进行抗拉性能试验时，应同时确定弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变 5 个参数。

E.4.2 到达试验期龄前，将制作的试件从养护室取出，待表面水分干燥后，将试件放置于试验机上下夹具中，保证上下夹具与试件中轴线对齐并一致。在试件弧形段与夹具接触部位放置 0.5mm~1.0mm 的橡胶垫片。将试件上端与试验机上夹头固定，升降拉力试验机至合适高度，调整试件方向，将试件下端固定。

E.4.3 当采用位移传感器测定变形时，应将位移传感器固定在变形测量架，并由标距定位杆进行定位，然后将变形测量架通过紧固螺丝固定在试件中部。从试件取出至试验完毕，不宜超过 4h。应提前做好变形测量准备工作。

E.4.4 启动试验机进行预拉，其荷载相当于破坏荷载的 15%~20%。预拉时，应测量应变值，计算偏心率，计算方法应按照 GB/T50081 的轴向拉伸试验方法。当试件偏心率>15%时，应对试件重新进行对中调整。

E.4.5 预拉完毕后，应重新调整测量仪器，进行正式测试。拉伸试验时，对试件进行连续均匀加荷，宜采用位移控制加荷，加荷速率宜控制在 0.2m/min。当采用位移传感器测量变形时，试件测量标距内的变形应由数据采集系统自动记录，绘制荷载-变形曲线。

E.4.6 当满足下列条件之一时，应终止加载，停止试验:

a)试件进入拉伸应变软化阶段后拉应力低于抗拉强度 30%时;

b)试件的拉应变达到 10000×10^{-6} 时。

E.5 计算结果和确定

E.5.1 弹性极限点在计算结果前，首先应确定抗拉弹性极限点。在位移传感器和数据采集系统绘制的荷载一变形曲线中，由线性阶段转变为非线性阶段的点为弹性极限点。当弹性极限点不明显时，应取拉应变为 200X10~对于曲线上的点作为弹性极限点。

E.5.2 弹性极限抗拉强度应按公式(E.1)进行计算:

$f_{te}=F_{te}/A$ (E.1)

式中:

F_{te}——弹性极限抗拉强度，单位为兆帕(MPa)，计算结果应精确至 0.01MPa;

F_{te}——弹性极限荷载，取弹性极限点处的荷载，单位为牛(N);

A——抗拉试件中部截面积，单位为平方毫米(m)。

E.5.3 弹性极限拉应变应按公式(A.2)进行计算:

A.5.3 弹性极限拉应变应按公式(A.2)进行计算:

$\mu_{te}=l_{te}/L$ (E.2)

式中:

μ_{te}——弹性极限拉应变，计算结果应精确至 $10x10^{-6}$，无单位;

l_{te}——弹性极限点处变形，单位为毫米(mm);

L——抗拉试件标距，单位为毫米(mm)。

E.5.4 拉伸弹性模量应按公式(A.3)进行计算:

$E_{te}=f_{ie}/\mu_{te}$ (E.3)

式中:

E_{te}——拉伸弹性模量，单位为吉帕(GPa)，计算结果精确至 0.1GPa。

E.5.5 抗拉强度应按公式(E.4)进行计算:

$f_{tu}=F_{max}/A$ (E.4)

式中:

f_{tu}——抗拉强度，单位为兆帕(MPa)，计算结果精确至 0.01MPa;

F_{max}——抗拉试验加载过程中的最大荷载，单位为牛(N)。

E.5.6 拉应变应按公式(A.5)进行计算:

$$\mu_{tu}=l_{tu}/L \qquad (E.5)$$

式中:

μ_{tu}——抗拉应变，计算结果应精确至 $10x10^{-6}$;

l_{tu}——最大拉应力处变形，取荷载-位移曲线中最大拉应力处的试件变形，单位为毫米(mm)。

E.5.7 试验结果处理开裂位置位于标距内的试件为有效拉伸试件，一批中有效拉伸试件数量少于 4 个。当有效拉伸试件数量少于 4 个时，该组试件无效。以所有有效拉伸试件测量的平均值确定弹性极限抗拉强度、弹性极限抗拉应变、弹性拉伸模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变的最终试验结果。

征询意见稿

附录 F 混凝土抗冻性能测试方法

F1.1 慢冻法

F1.1.1 本方法适用于测定混凝土试件在气冻水融条件下，以经受的冻融循环次数表示的混凝土抗冻性能。

F1.1.2 慢冻法抗冻试验所采用的试件应符合下列规定：

1 试验应采用尺寸为 100mm×100mm×100mm 的立方体试件；

2 慢冻法试验所需的试件组数应符合表 4.1.2 的规定，且每组试件应为 3 块；

表 4.1.2 慢冻法所需试件组数

设计抗冻标号	D25	D50	D100	D150	D200	D250	D300	D300 以上
检查强度所需冻融次数	25	50	50 及 100	100 及 150	150 及 200	200 及 250	250 及 300	300 及设计次数
鉴定 28d 强度所需试件组数	1	1	1	1	1	1	1	1
冻融试件组数	1	1	2	2	2	2	2	2
对比试件组数	1	1	2	2	2	2	2	2
总计试件组数	3	3	5	5	5	5	5	5

3 成型试件时，采用憎水性脱模剂。

F1.1.3 试验设备应符合下列规定：

1 冻融试验箱应能使试件静止不动，并应通过气冻水融进行冻融循环。在满载运转的条件下，冷冻期间冻融试验箱内空气的温度应能保持在(—20～—18)℃;融化期间冻融试验箱内浸泡混凝土试件的水温应能保持在(18～20)℃;满载时冻融试验箱内各点温度极差超过 2℃。

2 采用自动冻融设备时，控制系统应具有自动控制、数据曲线实时动态显示、断电记忆和试验数据自动存储等功能。

3 试件架应采用不锈钢或者其他耐腐蚀的材料制作，其尺寸应与冻融试验箱和所装的试件相适应。

4 称量设备的最大量程应为 20kg,感量超过 5g。

5 压力试验机应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的相关规定。

6 温度传感器的测量范围应为(-20～20)℃,测量精度应为 0.1℃。

F1.1.4 慢冻试验应按下列步骤进行：

1 在标准养护室内或同条件养护的冻融试验的试件，应在养护龄期为 24d 时从养护地点取出，随后应将试件放在(20±2)℃水中浸泡，浸泡时水面应高出试件顶面(20～30)mm,在水中浸泡的时间应为 4d,试件应在 28d 龄期时开始进行冻融试验。对于始终在水中养护的试件，当试件养护龄期达到 28d 时，可直接开始进行冻融试验，并应在试验报告中予以说明。

2 试件养护龄期达到 28d 时应及时取出冻融试验试件，用湿布擦除表面水分后对外观尺寸进行测量，试件的外观尺寸应满足本标准第 3.3 节的要求，并应分别编号、称量，然后按编号置入试件架内，试件架与试件的接触面积不宜超过试

征询意见稿

件底面的 1/5。试件与箱壁之间应至少留有 20mm 的空隙。试件架中各试件之间应至少保持 30mm 的空隙。

3 冷冻时间应在冻融箱内温度降至—18℃时开始计算。每次从装完试件到温度降至-18℃所需的时间应为(1.5～2.0)h;冷冻时冻融箱内温度应保持在(-20～-18)℃。

4 每次冻融循环中试件的冷冻时间小于 4h。

5 冷冻结束后，应立即加入温度为(18～20)℃的水，使试件转入融化状态，加水时间超过 10min。控制系统应确保在 30min 内水温不低于 10℃,且在 30min 后水温能保持在(18～20)℃。冻融箱内的水面应至少高出试件顶面 20mm。融化时间小于 4h。融化完毕视为该次冻融循环结束，可进入下一次冻融循环。

6 每 25 次循环宜对冻融试件进行一次外观检查。当出现严重破坏时，应立即进行称量。

7 试件在达到 GB-T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》表 4.1.2 规定的冻融循环次数后，应称量试件并进行外观检查，详细记录试件表面破损、裂缝及边角缺损情况。当试件表面破损或者边角缺损时，应先用高强石膏找平，再进行抗压强度试验。抗压强度试验应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的相关规定。

8 当冻融循环因故中断且试件处于冷冻状态时，试件应保持在冷冻状态，直至恢复冻融试验为止，并应在试验结果中注明故障原因及暂停时间。当试件处在融化状态下因故中断时，中断时间超过两个冻融循环的时间。在整个试验过程中，超过两个冻融循环时间的中断故障次数超过 2 次。

9 当部分试件由于失效破坏或者停止试验被取出时，应用空白试件填充空位。

10 对比试件应继续保持原有的养护条件，直到完成冻融循环后，与冻融试验的试件同时进行抗压强度试验。

F1.1.5 当冻融循环出现下列情况之一时，可停止试验：

1 达到规定的冻融循环次数；

2 抗压强度损失率达到 25%;

3 质量损失率达到 5%。

F1.1.6 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 强度损失率应按下式计算：

$$\Delta f_c = \frac{f_{co}-f_{cn}}{f_{co}} \times 100\% \qquad \text{F1.1.6-1}$$

式中:Δf_c——N 次冻融循环后的混凝土抗压强度损失率，精确至 0.1%;

f_{co}——对比用的一组标准养护混凝土试件的抗压强度测定值(MPa)，精确至 0.1MPa;

f_{cn}——经 N 次冻融循环后的一组混凝土试件抗压强度测定值(MPa)，精确至 0.1MPa。

2 f_{co}和f_{cn}应以三个试件抗压强度试验结果的算术平均值作为测定值。当三个试件抗压强度最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15%时，应剔除此值，再取其余两值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值均超过中间值的 15%时，应取中间值作为测定值。

3 单个试件的质量损失率应按下式计算：

$$\Delta W_{ni} = \frac{W_{oi}-W_{ni}}{W_{oi}} \times 100\% \qquad \text{F1.1.6-2}$$

式中：ΔW_{ni}——N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的质量损失率，精确至

0.01%;

W_{oi}——冻融循环试验前第 i 个混凝土试件的质量(g);

W_{ni}——N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的质量(g)。

5 每组试件的平均质量损失率应以三个试件的质量损失率试验结果的算术平均值作为测定值。当某个试验结果出现负值，应取 0 值，再取三个试件的算术平均值。当三个值中的最大值或最小值与中间值之差超过 1%时，应剔除此值，再取其余两值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值与中间值之差均超过 1%时，应取中间值作为测定值。

6 抗冻标号应根据抗压强度损失率不超过 25%或质量损失率不超过 5%时的最大冻融循环次数。

$$\Delta W_n = \frac{\sum_{i=1}^{3} W_{ni}}{3} \qquad \text{F1.1.6-3}$$

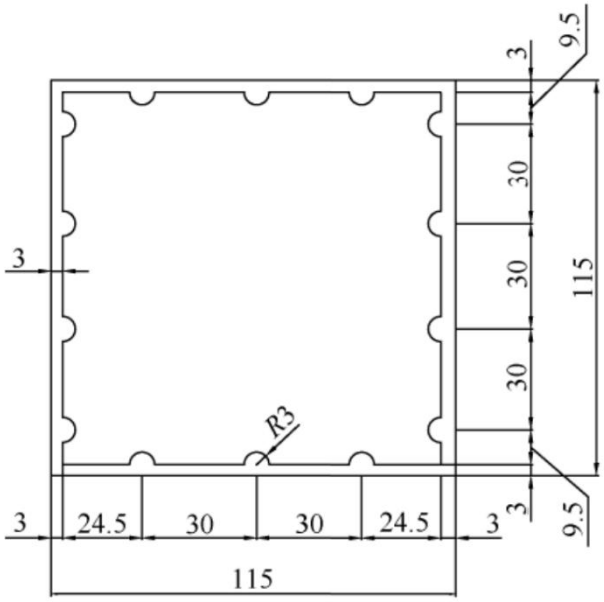
式中:ΔW_n——N 次冻融循环后一组混凝土试件的平均质量损失率，精确至 0.1%。

F1.2 快冻法

F1.2.1 本方法适用于测定混凝土试件在水冻水融条件下，以经受的快速冻融循环次数表示的混凝土抗冻性能。

F1.2.2 试验设备应符合下列规定：

1 试件盒(图 F1.2.2-1)宜采用具有弹性的橡胶材料制作，其内表面底部和侧面宜有半径为 3mm 橡胶突起部分。盒内加水后水面应至少高出试件顶面 5mm。试件盒横截面尺寸宜为 115mm ×115mm,试件盒长度宜为 500mm。



F1.2.2-1 橡胶试件盒截面示意图

2 快速冻融设备应符合现行行业标准《混凝土抗冻试验设备》JG/T243 的规定，应在冻融箱中心、中心平面任何一个对角线的两端分别设置温度传感器。运转时冻融箱内各点温度的极差不得超过 2℃。快速冻融设备应预留与快冻试验标准测温试件中温度传感器相连接的接口。

3 称量设备的最大量程应为 20kg,感量超过 5g。

4 混凝土动弹性模量测定仪应符合本标准第 5 章的规定。

5 温度传感器应在(—20～20)℃范围内测定温度，且测量精度应为 0.1℃。

6 测温试件应采用混凝土快冻法试验测温试件标准样品，测温试件的冻融介质应与试验试件的冻融介质一致。

F1.2.3 快冻试验所采用的试件应符合如下规定：

1 快冻试验应采用尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件，每组试

件应为 3 块。

2 制作成型试件时，采用憎水性脱模剂。

F1.2.4 快冻试验应按下列步骤进行：

1 试件的标准养护龄期应为 28d,非标养护龄期可根据设计要求选用 56d 或 84d。在标准养护室内或同条件养护的试件，应在冻融试验前 4d 时从养护地点取出，随后应将试件放在(20±2)℃水中浸泡，浸泡时水面应高出试件顶面(20～30)mm,在水中浸泡时间应为 4d。对于始终在水中养护的试件，当试件养护至试验龄期时，可直接开始进行冻融试验，并应在试验报告中予以说明。

2 试件养护至试验龄期时应及时取出试件，用湿布擦除表面水分后对外观尺寸进行测量，试件的外观尺寸应满足 GB-T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》标准 3.3 节的要求，并应编号、称量试件初始质量W_{oi},然后按本标准第 5 章的规定测定其横向基频的初始值f_{oi}。

3 将试件放入试件盒内，试件应位于试件盒中心，然后将试件盒放入冻融箱内的试件架中，并向试件盒中注入清水。在整个试验过程中，盒内水位高度应始终保持至少高出试件顶面 5mm。

4 测温试件盒应放在冻融箱的中心位置。

5 冻融循环过程应符合下列规定：

1)每次冻融循环应在(2～4)h 内完成，且用于融化的时间不得少于整个冻融循环时间的 1/4;

2)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±2)℃

和(5±2)℃;在任意时刻，试件中心温度不得高于 7℃,且不得低于-20℃;

3)每块试件从 3℃降至—16℃所用的时间不得少于冷冻时间的 1/2;每块试件从-16℃升至 3℃所用时间不得少于整个融化时间的 1/2,试件内外的温差不宜超过 28℃;

4)冷冻和融化之间的转换时间不宜超过 10min。

6 每隔 25 次冻融循环宜测量试件的横向基频f_{ni}。测量前应先将试件表面浮渣清洗干净并擦干表面水分，检查其外部损伤并称量试件的质量W_{ni},随后应按本标准第 5 章规定的方法测量横向基频。测完后，应迅速将试件调头重新装入试件盒内并加入清水，继续试验。试件的测量、称量及外观检查应迅速，待测试件应用湿布覆盖。

7 当有试件停止试验被取出时，应另用其他试件填充空位。当试件在冷冻状态下因故中断时，试件应保持在冷冻状态，直至恢复冻融试验为止，并应在试验结果中注明故障原因及暂停时间。试件在非冷冻状态下发生故障的时间不宜超过两个冻融循环的时间。在整个试验过程中，超过两个冻融循环时间的故障中断次数超过 2 次。

8 当冻融循环出现下列情况之一时，可停止试验：

1)达到规定的冻融循环次数；

2)试件的相对动弹性模量下降至 60%以下；

3)试件的质量损失率达到 5%。

F1.2.5 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 相对动弹性模量应按下列公式计算：

$$P_i = \frac{f_{ni}^2}{f_{oi}^2} \times 100\% \qquad \text{F1.2.5-1}$$

$$P = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} P_i \qquad \text{F1.2.5-2}$$

式中:P_i——经 N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的相对动弹性模量，精确至 0.1%;

f_{ni}^2——经 N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的横向基频(Hz);

f_{oi}^2——冻融循环试验前第 i 个混凝土试件横向基频初始值(Hz);

P——经 N 次冻融循环后一组混凝土试件的相对动弹性P-模量，精确至 0.1%。相对动弹性模量应以三个试件试验结果的算术平均值作为测定值。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15%时，应剔除此值，再取其余两值的算术平均值作为测定值;当最大值和最小值均超过中间值的 15%时，应取中间值作为测定值。

2 单个试件的质量损失率应按下式计算:

$$\Delta W_{ni} = \frac{W_{oi} - W_{ni}}{W_{oi}} \times 100\% \qquad \text{F1.1.6-2}$$

式中：ΔW_{ni}——N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的质量损失率，精确至 0.01%;

W_{oi}——冻融循环试验前第 i 个混凝土试件的质量(g);

W_{ni}——N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的质量(g)。

3 一组试件的平均质量损失率应按下式计算:

$$\Delta W_n = \frac{\sum_{i=1}^{3} W_{ni}}{3} \qquad \text{F1.1.6-3}$$

式中:ΔW_n——N 次冻融循环后一组混凝土试件的平均质量损失率，精确至 0.1%。

4 每组试件的平均质量损失率应以三个试件的质量损失率试验结果的算术平均值作为测定值。当某个试验结果出现负值，应取 0 值，再取三个试件的平均值。当三个值中的最大值或最小值与中间值之差超过 1%时，应剔除此值，再取

其余两值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值与中间值之差均超过 1%时，应取中间值作为测定值。

5 混凝土抗冻等级应以相对动弹性模量下降至不低于 60%或者质量损失率不超过 5%时的最大冻融循环次数来确定，并用符号 F 表示。

征询意见稿