

39 周和 52 周，此后可每半年测一次。每次测量的前一天，应将养护盒从养护室中取出并放入 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的恒温室中，恒温时间应为 $(24 \pm 4)\text{h}$ 。试件各龄期的测量应与测量基准长度的方法相同，测量完毕后，应将试件调头放入养护盒中并盖严盒盖，重新放回 $(38 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的养护室或养护箱中继续养护，直至下一个测试龄期。

- 5) 每次测量时，应观察试件有无裂缝、变形、渗出物及反应产物等，并应详细记录。必要时可在长度测试周期全部结束后，辅以岩相分析等手段，综合判断试件内部结构和可能的反应产物。

4 当碱-骨料反应试验出现下列两种情况之一时，可结束试验：

- 1) 在 52 周的测试龄期内膨胀率超过 0.04%；
- 2) 膨胀率虽小于 0.04%，但试验周期已经达 52 周（或一年）。

15.0.4 试验结果计算及处理应符合下列规定：

- 1 试件的膨胀率应按下列公式计算：

$$\epsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100\% \quad (15.0.4)$$

式中： ϵ_t ——试件在 t (d) 龄期的膨胀率，精确至 0.001%；

L_t ——试件在 t (d) 龄期的长度 (mm)；

L_0 ——试件的基准长度 (mm)；

Δ ——测头的长度 (mm)。

2 每组应取 3 个试件测值的算术平均值作为某一龄期膨胀率的测定值。

3 当每组平均膨胀率小于 0.020% 时，同一组试件中单个试件之间的膨胀率差值（最高值与最低值之差）不应超过 0.008%；当每组平均膨胀率大于 0.020% 时，同一组试件中单个试件的膨胀率差值不应超过平均值的 40%。

(50±2)mm 的圆柱体试件。每组试件应为 3 块。混凝土骨料最大公称粒径不应超过 25mm。

2 在试验室制作试件时,宜使用 $\phi 150\text{mm} \times 200\text{mm}$ 试模。试件成型后应立即用塑料薄膜覆盖并移至标准养护室。试件应在 (24±2)h 内拆模,拆模后应立即将试件送入标准养护室进行养护。

3 试件的养护龄期宜为 28d。达到龄期后,应从试件中切取 3 个高度为 (50±2)mm 的圆柱体作为试验用试件。试件两个端面应采用水砂纸和细锉刀打磨光滑,侧面应采用环氧树脂密封。

4 应将加工密封好的试件放入烘箱中,在 (60±5)℃ 下烘干 7d。烘干结束后应将试件移入温度 (20±2)℃、相对湿度 (60±5)% 的恒温恒湿环境中静置 14d。

16.0.4 抗气体渗透试验应按下列步骤进行:

1 试验设备连接准备好后,应将处理好的试件装入橡胶囊及上下两片 PVC 圆垫板之间,然后盖好顶板并拧紧顶板螺栓,使气体渗透单元处于密闭状态。

2 打开密封气路开关,应调节密封气路减压阀至橡胶囊气压恒定为 (0.7±0.01)MPa,并关闭密封气路开关进行封压。

3 打开进气气路开关,应确保试验装置的气密性,并调节进气气路减压阀至气路压力恒定为 (0.15±0.01)MPa。在气路压力恒定 30min 后开始测量,应每隔 5min 用皂膜流量计测量渗透单元出气嘴的气体流量,并以连续两次测量值之差小于测量平均值的 3% 时的气体流量作为测量结果。

4 通过调节进气气路减压阀来调整气路压力,并应按本条第 3 款的步骤,分别测量气路压力为 0.20MPa、0.30MPa、0.40MPa 时渗透单元出气嘴的气体流量。

16.0.5 试验结果计算及处理应符合下列规定:

1 一组试件的气体流量应按下式计算:

$$Q_p = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 Q_{pi} \quad (16.0.5-1)$$

式中: Q_{pi} ——在某个气路压力下的第 i 个混凝土试件的气体流量 (m^3/s);

Q_p ——在某个气路压力下的一组混凝土试件的气体流量 (m^3/s), Q_p 应以三个试件气体流量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%, 应剔除此值, 并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 一组试件在某个气路压力下的渗透率应按下式计算:

$$k_p = \frac{2\mu L Q_p P_{\text{atm}}}{A(P_s^2 - P_{\text{atm}}^2)} \quad (16.0.5-2)$$

式中: k_p ——在某个气路压力下的混凝土气体渗透率 (m^2), 精确至 $1.0 \times 10^{-18} \text{m}^2$;

P_{atm} ——测试条件下的大气压力 (Pa), 精确至 $1.0 \times 10^4 \text{Pa}$;

P_s ——渗透单元进气嘴的绝对压力, 等于大气压力与气路压力之和 (Pa), 精确至 $1.0 \times 10^4 \text{Pa}$;

L ——试件厚度 (m);

μ ——氮气动力黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), 取为 $1.76 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$;

A ——试件横截面面积 (m^2);

Q_p ——在某个气路压力下的一组混凝土试件的气体流量 (m^3/s)。

3 一组试件的平均渗透率 k 应取气路压力分别为 0.15MPa、0.20MPa、0.30MPa、0.40MPa 下计算所得 k_p 的平均值。

4 一组试件的固有渗透率 k_v 应将气路压力分别为 0.15MPa、0.20MPa、0.30MPa、0.40MPa 下的 $1/P_m$ 与对应的气体渗透率 k_p 按下式进行线性回归:

$$k_p = b \times \frac{1}{P_m} + k_v \quad (16.0.5-3)$$

式中: k_p ——在某个气路压力下的混凝土气体渗透率 (m^2), 精确至 $1.0 \times 10^{-18} \text{m}^2$;

b ——线性回归斜率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^2$);

k_v ——混凝土固有渗透率 (m^2), 精确至 $1.0 \times 10^{-18} \text{m}^2$;

P_m ——渗透单元进气嘴的绝对压力与大气压力的平均值 (Pa), 精确至 $1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080
- 2 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 3 《混凝土试模》JG/T 237
- 4 《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243
- 5 《混凝土试验用搅拌机》JG/T 244
- 6 《混凝土试验用振动台》JG/T 245
- 7 《混凝土碳化试验箱》JG/T 247
- 8 《混凝土抗渗仪》JG/T 249
- 9 《混凝土氯离子电通量测定仪》JG/T 261
- 10 《混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262

中华人民共和国国家标准

混凝土长期性能和耐久性能
试验方法标准

GB/T 50082 - 2024

条文说明

编制说明

《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 - 2024 经住房和城乡建设部 2024 年 8 月 23 日以第 142 号公告批准、发布。

本标准是在《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 - 2009（以下称“原标准”）的基础上修订而成。上一版的主编单位是中国建筑科学研究院，参编单位是：中国铁道科学研究院、辽宁省建设科学研究院、清华大学、中冶集团建筑研究总院、甘肃土木工程科学研究院、云南省建筑科学研究院、贵州中建建筑科研设计院、河南省建筑科学研究院、哈尔滨工业大学、深圳市高新建商品混凝土有限公司、中建三局商品混凝土公司、深圳大学、云南建工混凝土有限公司、重庆市建筑科学研究院、中南大学、武汉大学、青岛理工大学、中国水利水电科学研究院、北京耐恒科技发展有限公司、北京三思行测控技术有限公司、上虞宏兴机械仪器制造有限公司、舟山市博远科技开发有限公司、无锡建仪仪器机械有限公司、天津市天宇实验仪器有限公司、天津市建筑仪器试验机公司、上海国际港务（集团）有限公司、武汉尚品科技有限公司、苏州市东华试验仪器有限公司、建研建材有限公司。主要起草人是：冷发光、戎君明、丁威、谢永江、王元、丁建彤、赵霄龙、田冠飞、郝挺宇、杜雷、邓岗、林力勋、赵铁军、张彩霞、巴恒静、张国林、郭延辉、武铁明、邢锋、李章建、杨再富、谢友均、曾力、周永祥、马孝轩、刘岩、李金玉、王植槐、陆国良、张关来、诸华丰、徐锡中、王玉杰、潘明、何更新、韦庆东、纪宪坤、罗文斌、曹芳、王雪昌。

本标准修订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了

我国工程建设混凝土耐久性试验方法领域的实践经验，同时对原标准所参考的重要国外标准的更新修订情况进行了系统调研，并在本次修订中进行了借鉴。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明，但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	88
2	术语和符号	89
3	基本规定	91
3.1	混凝土取样	91
3.2	试件的制作和养护	91
3.3	试验报告	92
4	抗冻试验	93
4.1	慢冻法	93
4.2	快冻法	98
4.3	单面冻融法(盐冻法)	103
5	动弹性模量试验	109
6	抗水渗透试验	112
6.1	渗水高度法	112
6.2	逐级加压法	113
7	抗氯离子渗透试验	115
7.1	快速氯离子迁移系数法(RCM法)	115
7.2	电通量法	119
8	收缩试验	124
8.1	非接触法	124
8.2	接触法	126
8.3	波纹管法	129
9	早期抗裂试验	131
10	受压徐变试验	133
11	碳化试验	138
12	混凝土中钢筋锈蚀试验	141

13	抗压疲劳变形试验.....	143
14	抗硫酸盐侵蚀试验.....	148
15	碱-骨料反应试验	151
16	抗气体渗透试验.....	157

1 总 则

1.0.1 编制本标准的目的在于为设计、施工、监理、质检和科研等单位的有关人员，在确定或检验混凝土长期性能和耐久性能时，提供一个统一的试验准则，使所有的试验及试验结果具有一致性和可比性，并有助于控制混凝土工程质量。

1.0.2 规定本标准的适用范围为建设工程中混凝土长期性能和耐久性能试验。我国水工、水运、公路等行业都已有或正在编制相应的混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准，其中多数内容与本标准相同，但也有些试验方法因为使用条件和要求不同，在一些具体的参数或规定上往往很难一致，因此对于这些工程或行业中的混凝土长期性能和耐久性能试验方法，宜以相应专业标准为主要依据。

1.0.3 本标准主要规定混凝土长期性能和耐久性能试验方法，在按照本标准进行有关混凝土长期性能和耐久性能试验时，不能违反国家法律、行政法规的规定。试验过程中还涉及其他标准，如《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080、《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 以及相关的仪器设备、试模等标准，因此进行混凝土长期性能和耐久性能试验除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定，尤其是强制性标准的有关规定。

2 术语和符号

2.1.1 本标准规定的抗冻标号主要是反映慢冻法的评价指标。慢冻法与快冻法的区别不仅仅是冻融时间长短不同，而且其冻融试验条件也不同。慢冻法是采用气冻水融的冻融方式，而快冻法是采用水冻水融的冻融方式，二者针对不同的环境条件和工程需要，应注意区别。

2.1.2 本标准规定的抗冻等级主要是反映快冻法的评价指标，以区别于慢冻法的评价指标。

2.1.3 电通量法又称为电量法、导电量法等。本标准规定了以测量通过混凝土试件的电通量（库仑值）来反映混凝土抗氯离子渗透性的试验方法，与美国 ASTM C1202 和 AASHTO T277 标准规定的方法原理相同。

2.1.4 RCM 是英文 rapid chloride ions migration coefficient 的缩写。作为标准方法一般指唐路平教授等提出的测量非稳态情况下氯离子迁移系数的方法，其原理是通过测量混凝土中氯离子渗透深度，计算得到氯离子迁移系数。该方法已经被列为北欧标准 NT BUILD492 《Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials; Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments》，目前正在被列为欧盟的标准。我国的《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T50476、《水工混凝土试验规程》SL352 等已经将 RCM 法列为标准方法。其原理与本标准相同，但操作方式与本标准的规定有一些区别。本标准是等同采用 NT BUILD492 标准，而国内其他相似标准对 NT BUILD492 规定的操作方式等做了较大修改。根据本标准编制组与 NT BUILD492 标准主编人和 RCM 法发明人进行沟通，结合编制组的试验验证结果，认为等同采用 NT BUILD492 标准比较合适。

2.1.5 实践表明，在硫酸盐环境中，混凝土通常只有在干湿循环的条件下才会产生比较严重的破坏。本标准根据实践经验、试验验证并参考国外标准，制定了以干湿循环为基础的抗硫酸盐侵蚀试验方法。评价指标为抗硫酸盐等级，其含义是混凝土试件在硫酸盐溶液中能够经受的最大干湿循环次数。美国等发达国家也是采用抗硫酸盐等级来评价混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。只是国外是以混凝土的表观破坏情况来分级，而本标准是根据干湿循环次数来分级。

3 基本规定

3.1 混凝土取样

3.1.1、3.1.2 本条规定了混凝土长期性能和耐久性能试验时的取样方法，与现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 中规定的方法基本相同。强调了每组试件所用的混凝土拌合物应从同一盘混凝土或同一车混凝土中取样，以减少取样误差。

对于混凝土长期性能和耐久性能试验，除制作进行检验的试件外，尚需制作相应数量的对比试件或基准试件及辅助试件。这里的对比试件或基准试件是指确定长期性能或耐久性能相对指标时用作基准的试件，如抗冻标号测定中的标准养护试件，对比试件和基准试件必须与试验用试件采用同一盘混凝土制作。辅助试件是指试验时不测取读数，或虽测取读数但仅用作试验控制而不在结果计算中使用的试件，如耐久性指标测定中的温控试件及补空试件，辅助试件并不要求与试验用试件采用同一盘混凝土制作。

3.2 试件的制作和养护

3.2.1 本条规定了混凝土长期性能和耐久性能试验所用试件的制作和养护方法。混凝土长期性能和耐久性能试验所用的多数试件的制作和养护方法与力学性能试验所用试件的制作和养护方法基本相同，故规定应按现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 中规定的方法进行。但也有些特殊的试验，其试件的制作方法有例外，如非接触法收缩试验、早期抗裂试验等，对这些例外试件的制作方法，均在相应的试验方法标准中予以具体规定。

3.2.2 本条规定了制作混凝土试件所用的试模应满足现行国家标准《混凝土试模》JG/T 237 的要求。

3.2.3 由于多数混凝土耐久性指标与强度指标有一定相关性，有些耐久性试验本身就是用强度指标来表达，且出具的试验报告也需要列出对应的强度等级和实测强度数据，故规定应同时制作强度试件。

3.2.4 《混凝土试验用搅拌机》JG/T 244 和《混凝土试验用振动台》JG/T 245 分别是《混凝土试验用搅拌机》JG 3036 和《混凝土试验用振动台》JG/T 3020 的修订版本。

3.3 试 验 报 告

3.3.1~3.3.3 这几条规定了混凝土长期性能和耐久性能试验应出具试验报告，以及有关单位（委托单位、试件制作单位和试验单位等）应为试验报告提供的具体内容，供有关方使用。

4 抗冻试验

4.1 慢冻法

4.1.1 本条规定了慢冻法的适用范围和目的。

慢冻法抗冻性能指标以抗冻标号来表示，供设计或科研时使用。

本标准采用三种混凝土抗冻性能试验方法——慢冻法、快冻法和单面冻融法（盐冻法）。慢冻法所测定的抗冻标号是我国一直沿用的抗冻性能指标，目前在建工、水工碾压混凝土以及抗冻性要求较低的工程中还在广泛使用。近年来虽然一些部门感到检验抗冻标号的试验方法所需要的试验周期长、劳动强度大，有以快冻法检验抗冻耐久性指标来替代的趋势，但是这个替代并不会很快实现。慢冻法采用的试验条件是气冻水融法，该条件对于并非长期与水接触或者不是直接浸泡在水中的工程，如对抗冻要求不太高的工业和民用建筑，以气冻水融“慢冻法”的试验方法作为基础的抗冻标号测定法，仍然有其优点，其试验条件与该类工程的实际使用条件比较相符。况且慢冻法在我国已经有几十年的使用历史，经过广大工程技术人员多年实践和研究，已经积累了丰富的试验经验。目前的自动冻融循环设备，实现了自动控制、冻融自动循环、数据曲线实时显示、断电自动记忆和试验数据自动存储等功能，消除了由于原慢冻设备的原始、冻融分离和人为干预等造成的误差，使试验过程更科学，工作量大大减少，试验结果更可靠。目前慢冻试验设备也有了相应的产品标准《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243，故本标准仍然保留慢冻试验方法。预计在今后比较长的一段时间内，我国仍然会是几种抗冻性能指标同时并存的局面，因此，本标准同时列入几种相应的试验方法。

4.1.2 本条规定了慢冻法试验所使用的试件形状、尺寸、组数和每组试件的个数等要求。

慢冻法试验要成型三种试件：测定 28d 强度所需要的试件、冻融试件以及对比试件，这些要求与原标准基本相同，只是目前有些重要工程对抗冻要求较高，故对抗冻标号分级增加了 D300 以上的等级。本标准将抗冻标号按照 D25、D50、D100、D150、D200、D250、D300、D300 以上等 8 种情况规定了相应的试件数量。另外，由于砂石标准的修改，骨料粒径的分级与原标准有一定区别。慢冻法试验对于设计抗冻标号在 D50 以上的，通常只需要两组冻融试件，一组在达到规定的抗冻标号时测试，一组在与规定的抗冻标号少 50 次时进行测试。抗冻标号在 D300 以上的，按 300 次或设计规定的次数进行测试。更高的等级可按照 50 次递增，并增加相应试件数量。

试验证明，制作试件时用机油（尤其黏度大的机油）或其他憎水性脱模剂，对混凝土长期性能和耐久性能试验结果有明显影响，尤其是对抗冻、收缩、抗硫酸盐侵蚀等与水分交换过程有关的试验结果影响比较显著。对于这类试件的制作，一般选用水性脱模剂或采用塑料薄膜等代替脱模剂。

4.1.3 本条规定了慢冻法试验设备的有关要求。

1 由于目前市场上的自动抗冻设备控温精度较原来的冰箱有较大提高，故本标准规定的冻结温度为 $(-20 \sim -18)^{\circ}\text{C}$ ，融化温度为 $(18 \sim 20)^{\circ}\text{C}$ 。同时规定了满载时箱内温度极差不超过 2°C ，以保证箱内温度均匀性。目前市场供应的设备一般能够满足此温度控制精度要求。

2 规定慢冻试验用自动冻融设备应具备自动控制、数据曲线实时显示、断电记忆、数据自动存储功能等附加功能，以提高试验精度和水平。

3 本标准规定试件架应采用不锈钢或者耐腐蚀的材料制作，且试件架的尺寸应与试件、冻融试验箱等匹配。

5 对压力试验机的要求，在现行国家标准《混凝土物理力

学性能试验方法标准》GB/T 50081 中有详细规定。

6 本标准对慢冻试验设备所采用的热电偶、电位差计等传感器或温度检测仪的量程和精度作出规定。

由于慢冻试验设备已有行业标准《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243, 故慢冻试验设备还应符合该标准的有关规定。

4.1.4 本条规定了慢冻法抗冻试验应遵照的步骤。

1 慢冻试验用试件的试验龄期一般为 28d, 设计有特殊要求时按照设计要求进行。科研中也可以采用其他龄期进行试验, 试验数据可用来比对。浸泡试件用的水温为 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, 现在一般的试验室均建有混凝土标准养护室或恒温室, 该温度条件很容易得到满足。浸泡时间统一为 4d。按照国内有关标准规定, 试件一般应进行标准养护, 但有些行业或者研究项目可能要求试件直接在水中养护, 对这种情况, 本标准规定可以直接进行试验, 不需要在抗冻试验前再进行 4d 的泡水, 但应在试验报告中应注明这种养护方式。

试件的外观检查主要是测量试件的尺寸, 查看有无裂缝、破损和掉角等情况, 并做好记录, 以备分析试验结果用。

2 规定了试件架与试件的接触面积。二者之间的接触面积不宜过大, 一般试件架与试件的接触面积应小于试件底面积的 $1/5$ 。对于尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的抗冻试件, 一般在底面垫上两条宽度为 10mm 的垫条即可满足此要求。为了减小冻融试验箱的空间, 规定试件之间的最小空隙距离为 30mm, 试件与冻融试验箱侧壁之间的最小距离为 20mm。

3 本标准对冻融试验箱的降温速率进行了统一规定, 要求在 $(1.5 \sim 2.0)\text{h}$ 内降到规定的冻结温度, 这样可保证市场上的慢冻试验设备技术性能基本接近, 确保试验结果具备可比性和可重复性。

4 由于不同尺寸的试件抗冻试验结果差别非常大, 没有可比性, 本标准将慢冻试验用的试件尺寸统一为一种: $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$, 冻结和融化时间也统一规定为不小于 4h。这

样可保证各单位采用的试验设备性能基本接近，试验结果更加具有可比性，也便于设备厂家在设备出厂时对调试设备有统一的要求。

6 规定了每 25 个循环检查一次试件的外观和质量损失情况。由于一个冻融试验箱往往同时进行多组试件的冻融试验，因此本标准规定对于某组试件的平均质量损失率达到 5% 时，可以停止对该组试件的冻融试验，其他没有达到此失重率的试件可继续进行冻融试验。

7 规定了试件何时需要进行抗压强度试验，以及在抗压强度试验前应该进行的外观检查工作和试件破损后的处理方法。试件表面严重破损后应采用高强石膏等材料找平后再进行抗压强度试验，否则试验结果不准确。一般高强石膏几小时即可达到相应强度。本次修订增加了试件边角缺损时应先用高强石膏找平的规定，主要是考虑到边角破损也会影响试验结果的准确性。

8 冻融循环中断后，要求将试件保持在冻结状态，以免试件失水，影响试验结果。一般可将试件保存在原容器内，并用冰块围住。如条件不具备，可将试件在潮湿状态下用防水材料包裹，加以密封，防止水分损失。

验证试验表明，处于融化状态下中断试验时间过长或次数过多，或对中断试验的试件处置不当，将对试验结果有较大影响。

9 在大多数情况下，保持冻融试验设备中装满受测试件或一直维持开始试验的试件数量，就可以很容易达到温度均匀性和所需时间的要求。如果冻融箱内不能装满试件或有试件中途被取出来，应当使用空白试件来填充空位，这种处理方法同时可以保证试件本身和冻融箱内流体条件的均匀性。

10 规定了对比试件应继续保持原有的养护条件（标准养护、水中养护或自然养护等），对比试件是用来作为强度损失率的计算基准。

4.1.5 本条规定了慢冻法抗冻试验的结束条件。慢冻法抗冻试验结束的条件有三个：规定的冻融次数（如设计规定的抗冻标

号)、抗压强度损失率达到 25%、质量损失率达到 5%。三个指标只要有一个被超出，即可停止试验。

4.1.6 本条规定了试验结果计算和处理的方法。试验结果得到三个指标：强度损失率、质量损失率和抗冻标号。

1、2 规定了抗压强度试验结果的处理方法，尤其是明确了对试验误差的处理方法。由于抗冻试验需要的周期往往较长（如抗冻标号为 D100 的混凝土，试验时间最快需要约 33d），测得一个试验结果非常不容易，故规定在三个试件的抗压强度试验结果中，当有两个值与中间值之差均超过中间值的 15% 时，取中间值为测定值。而《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019 对抗压强度试验结果处理方法的规定为：当有两个值与中间值之差均超过中间值的 15% 时，则试验结果无效。

3 规定了单个试件的质量损失率计算公式以及计算精度。

4、5 需要注意的是，计算质量损失率用的是同一组试件，而计算强度损失用的是两组试件。即计算质量损失率并不需要对比试件，而是以同一组试件在冻融试验前后的质量变化来反映。

公式（4.1.6-3）中规定了一组三个试件的质量损失率平均值的计算方法，并对质量损失率的计算和误差处理做了一些特殊规定。由于抗冻试验初期，试件的质量可能还会增加，使得质量变化的计算结果可能出现负值。用负值计算很不方便，而且没有意义，因此本标准规定，当某个试验结果出现负值时，则取该值为 0 值再进行计算。

质量损失率误差处理是按照试验结果差异的绝对数来处理，而不是像抗压强度试验结果那样，按照差异的相对数来处理。由于质量损失率最大值可取 5%（因超过 5% 即可以停止试验），则两个试验结果的质量损失率的绝对数相差 1%，大约相当于相对数相差 20%。

6 以混凝土试件所能经受的最大冻融循环次数，作为慢冻法试验的混凝土抗冻性能指标，该指标称为混凝土抗冻标号，并用符号 D 表示（符号同原标准）。

4.2 快冻法

4.2.1 本条规定了快冻试验方法的适用范围和目的。

快冻法采用水冻水融的试验方法，这与慢冻法的气冻水融方法有显著区别。

本试验方法参考了美国 ASTM C666/C666M-2003《Standard test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing》和日本 JIS A 6204—2000《混凝土快速冻融试验方法》等标准，试验采用的参数、方法、步骤及对仪器设备的要求与 ASTM C666 基本相同。在我国铁路、水工、港工等行业，该方法已成为检验混凝土抗冻性的唯一方法。由于水工、港工等工程对混凝土抗冻性要求高，其冻融循环次数高达 200 次~300 次，且经常处于水环境中，如以慢冻法检验，所耗费的时间及劳动量较大，故一般采用水冻水融为基础的快冻试验方法，以提高试验效率。ASTM C666 中混凝土抗冻性试验方法有 A 法和 B 法两种，A 法要求试件全部浸泡在清水（或 NaCl 溶液）中快速冻融，B 法要求试件在空气中冻结、水中溶解，但两种方法均依靠测量试件的动弹性模量变化来实现对试件抗冻性的评定。虽然 ASTM C666 中存在两种方法，但在实际应用中，人们习惯于采用 A 法来评价混凝土的抗冻性。本标准主要参考了 ASTM C666 中的 A 法，并进行了调整和补充。另外，日本规范 JIS A 6204 中也是仅包含类似 ASTM C666 中 A 法的部分。

日本学者洪悦郎等曾著文报道他们为拟订日本工业标准（JIS）的混凝土抗冻性试验方法所做的工作，指出搅拌温度、脱模前室内养护温度、脱模前试件上有无封闭物覆盖及通风情况、试件尺寸，尤其是横向尺寸差异、冻融开始龄期、装载冻融试件容器形状等因素，对冻融试验的结果影响重大。本标准对上述可能影响试验结果的因素予以了考虑。

4.2.2 本条对快冻试验所采用试验设备应满足的技术要求等做了规定。

1 日本学者洪悦郎指出，不同的试件容器，在试件周围产生的水膜厚度不同，会影响试验结果。另外，容器中突起的棱条形状（矩形、半圆形或无棱条网格）也会影响试验结果。美国、日本新规范中均要求使用橡胶类的柔软容器作为试件容器，禁止使用钢容器。随着技术水平的不断提高，目前国内的大部分试验室中钢容器已被橡胶容器替代，因此在本次修订中提出使用橡胶容器，并对橡胶容器的尺寸、棱条形状等做了具体规定。

由于目前国内的橡胶盒容易损坏，价格比钢制的贵，而且试件盒一旦破损会对试验带来较大麻烦，因此本标准规定试件盒宜采用具有弹性的橡胶材料制作。实际操作时容许略有选择，如条件不具备或者原设备的钢制盒仍然完好，不必予以淘汰，这种情况可以使用钢制试件盒。如果是新加工的钢制盒，应采用不锈钢材料制作，盒内应垫以橡胶材料。

2 由于目前国内市场上部分抗冻试验设备质量较差，尤其是温度控制能力较差，为了促进我国抗冻试验设备质量的提高，保证试验质量，对抗冻试验设备的温度控制方法进行了更严格的规定。要求除了测温试件安装温度传感器外，还要在冻融试验箱的中心处以及试验箱中心平面任一对角线两端处安装温度传感器，以便对试验箱温度进行监测，以保证试验箱温度均匀性满足试验要求。

5 规定了温度传感器（热电偶、电位差计等）在（-20～20）℃范围内的测量精度不能低于0.1℃。

6 从近些年的实际应用情况来看，原标准所规定的采用防冻液作为测温试件的冻融介质，可能会对试验结果造成较大影响。由于防冻液种类多样，其导热系数与水不尽相同；另外，试验试件以水作为冻融介质，水在结冰、融化下发生吸热、放热作用，与不会结冰、融化的防冻液的温度历程同样有所区别。这两种冻融介质下温度历程的不一致，使得测温试件中心温度不能很好地代表试验试件的中心温度，而冻融设备主要根据测温试件所反映的温度信号来进行温度调控，这便导致试验试件所经受的实

际冻融制度并不满足标准要求。

另一方面是测温试件中预埋传感器的问题。尽管原标准规定“测温试件的温度传感器应埋设在试件中心”，并且专门强调“温度传感器不应采用钻孔后插入的方式埋设”。但在实际试验操作中，由于传感器形式多样，对中预埋的方式也不同，仍有可能在传感器与测温试件之间出现空隙，从而使传感器直接与测温试件冻融介质接触，造成试验试件的实际冻融循环制度与标准规定的冻融循环制度不符。

准确测温是本试验方法的重要前提，而上述两方面会显著改变实际冻融制度，测温出现问题后，有些单位甚至反映试验过程中似乎结冰后从未融化过，其影响可见一斑。并且，测温不准确往往会高估混凝土的抗冻性，给工程质量带来隐患。因此，本次修订中，一方面将测温试件与试验试件的冻融介质均统一为水；另一方面，测温试件规定采用混凝土快冻法试验测温试件标准样品，而不应由试验单位自行制作。标准样品具有优异的抗冻性能，即便在以水为冻融介质的条件下，也能抵抗相当次数的冻融循环作用，具有足够的使用寿命，并且能够保证传感器的正确埋设，以规避试验单位自行制作时可能出现的种种问题。

4.2.3 本条规定了快冻试验所用试件的尺寸、形状、制作方法、每组试件个数和对测温试件的要求等。

1 本标准规定快冻试验应采用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体试件。这与美国 ASTM C666 标准略有区别，ASTM C666 规定的试件也是棱柱体，但其截面和长度容许有一个变化范围：棱柱体试件的宽度、厚度或直径均不小于 75mm 且不大于 125mm ；试件的长度不小于 275mm 且不大于 405mm 。本标准规定的试件尺寸处于 ASTM C666 规定范围内，与日本 JIS A 6204 标准基本一致。

由于每个冻融循环制度相对固定，试件中心的极限温度也相同，因此在试件尺寸不同，尤其是横向尺寸不同时，对于不同尺寸的单个试件，其升降温的速率会产生一定的差别，而这势必影

响对混凝土抗冻性的正确评价。例如,把同样的混凝土制作成不同尺寸的抗冻试件后,由于横向尺寸不同导致的升降温速率差别,其抗冻性试验将得到不同的结果。为了避免这种情况,本标准将试件尺寸统一为 100mm×100mm×400mm。

4.2.4 本条规定了快冻试验的程序和操作步骤。

1 对于冻融开始的龄期,美国和日本规范都是 14d 龄期开始。试验证明,开始龄期越晚,抗冻性越好。原标准中试验开始的龄期为 28d,考虑到标准的延续性和日益增加的大掺量矿物掺合料混凝土的应用,本次修订时规定试件的标准养护龄期为 28d,非标养护龄期可根据设计要求选用 56d 或 84d。

抗冻试验前,试件需要至少泡水 4d;水中养护的试件可以直接进行抗冻试验。这与慢冻法试验对试件预处理的规定相同。

2 增加对试件初始质量和初始动弹性模量或基频初始值测量的规定。目前市场上有些动弹性模量测量仪可以直接读出试件的动弹性模量值,这可简化计算过程,提高试验效率。

3 规定试件应位于试件盒的中心位置,这是为了使试件受温均匀。ASTM C666 规定试件周围的水层厚度为 1mm~3mm,国内的公路行业标准《公路工程水泥及混凝土试验规程》JTG E30-2005、电力行业标准《水工混凝土试验规程》DL/T 5150-2001 以及水利行业标准《水工混凝土试验规程》SL/T 352-2006 等均规定试件顶面水层厚度为 20mm。本标准将试件顶面清水高度规定为 5mm 左右,与美国标准基本接近,但比美国标准规定的 1mm~3mm 更具有可操作性。实际上,若试件顶部的水面过高,在冻结时由于表层水先结冰,限制了表层下水的移动,在冻结时会对试件产生很大的压力,从而对试件造成破坏。

5 规定了快冻法的冻融循环制度。

- 1) 规定一个冻融循环持续的时间为 2h~4h,用于融化的时间为 0.5h~1h,与原标准一致。
- 2) 规定了冻结和融化终了的温度,与 ASTM C666 和我国公路、水工等标准规定的温度一致。

3) 规定了冻结和融化时温度变化速率, 以及试件的内外温差。

4) 规定了冻结和融化过程的转换时间不宜超过 10min, 若转换时间过长, 会影响规定的冻融制度, 从而影响试验结果。

6 规定了试件横向基频的测试时间间隔、基频的测试方法和有关要求。测试过程中防止待测试件损失水分是非常重要的, 故试件测量和外观检查等应迅速、及时。

8 规定了快冻法冻融循环试验结束的三个条件: 规定的冻融次数 (如设计规定的抗冻等级)、动弹性模量下降至初始值的 60%、质量损失率达到 5%。三个指标只要有一个被超出, 即可停止试验。

对于快冻法停止冻融循环试验的条件, 本标准参考了日本 JIS A 6204—2000。而美国 ASTM C666 规定的停止试验条件为冻融达 300 次循环、相对动弹模量降至 60% 以下, 同时将试件长度增长达到 0.1% 作为可选的停止条件, 考虑到测长要比称量试件质量的操作复杂, 本标准采用质量变化作为可选的停止试验条件。

4.2.5 本条规定了快冻法试验结果计算和处理的方法。

1 试件动弹性模量与试件质量、尺寸和横向基频等有关。相对动弹性模量计算是针对同一个试件, 质量和尺寸相同 (除非有严重剥落), 因此相对动弹性模量的计算只与横向基频有关。

2~4 质量损失率试验结果的计算和处理与慢冻法相同。

5 规定了抗冻等级确定的方法和表示符号。抗冻等级确定有三个条件: 一是相对动弹性模量下降至初始值的 60%; 二是质量损失率达到 5%; 三是冻融循环达到规定的次数。三个指标任何一个被超出, 则可停止试验, 并以此时的冻融循环次数作为抗冻等级。当以 300 次作为停止试验条件时, 则抗冻等级大于或等于 F300。

快冻法抗冻等级用符号 F 表示, 而慢冻法抗冻标号是用符

号 D 表示, 注意二者区别。

4.3 单面冻融法 (盐冻法)

4.3.1 本条规定了单面冻融试验方法的适用范围和检验指标。

混凝土抗冻性试验方法 (快冻法) 源自 ASTM C666, 适用于评价长期浸泡在水中并处于饱水状态下的混凝土抗冻性。在我国北方地区, 冬季大量使用除冰盐对道路进行除冰, 此时的混凝土道路及周边附属建筑物遭受的冻融往往不是饱水状态下水的冻融循环, 而是干湿交替及盐溶液存在状态下的冻融循环; 冬季海港及海岸水工建筑物, 水位变动区附近的混凝土也并不是在饱水状态下遭受水的冻融。对于上述情况下混凝土的抗冻性, 用原有的混凝土抗冻性试验方法可能无法进行准确评估。为此, 国际材料与结构研究实验联合会 (RILEM) 近年来做了大量的工作, 成立了专门技术委员会, 并在总结当代基础研究和现有实践基础之上, 制定了推荐方案和评判依据。

1995 年, 德国 Essen 大学建筑物理研究中心的 M. J. Setzer 教授提出了较为成熟的评价混凝土抗冻性的试验方法 RILEM TC 117 - FDC, 其中包括 CDF (CF) Test (全名为 Capillary Suction of Deicing Chemicals and Freeze-Thaw Test)。2002 年, 在进一步研究的基础上, 又提出了 RILEM TC 176, 该方法在对 CDF (CF) Test 的标准偏差和离散值进行了补充后, 提出了改进后的 CIF (CF) Test (全名为 Capillary Suction, Internal Damage and Freeze Thaw Test, 毛细吸收、内部破坏和冻融试验)。另外欧洲标准 prENV12390 - 9: 2002 《Testing Hardened Concrete-part 9: Freeze-thaw-scaling》也提出了类似的盐冻试验方法。

CIF (CF) Test 可以对处于不饱水盐溶液冻融情况下的混凝土抗冻性进行评价。本标准参考了 RILEM TC 176: 2002 中的 CIF (CF) Test 和 prENV12390 - 9: 2002, 制定了盐冻环境下混凝土抗冻性的试验方法, 本标准相当于等同采用 RILEM

TC 176: 2002 中的 CIF (CF) Test。由于试验中试件只有一个面接触冻融介质, 故将其定名为单面冻融法。由于冻融介质为盐溶液, 故又称盐冻法。

4.3.2 本条规定了进行单面冻融试验时, 试验室或试验环境应满足的温度和湿度条件。该条件与第 8 章收缩试验室的条件相同。

4.3.3 本条规定了单面冻融试验所使用的设备和用具要求。

1 规定试件盒应采用不锈钢材料制作, 是因为试验用冻融介质为 3% 的 NaCl 溶液, 会对其他金属材料造成腐蚀。若采用非金属材料, 传热又太慢。

2 规定了液面调整装置的组成和结构。

3、4 规定了冻融试验箱应满足的技术条件。冻融试验箱可设计成自动循环装置, 有关技术要求在现行行业标准《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243 中有具体规定。

应注意单面冻融试验设备与快冻和慢冻设备有所区别, 其结构形式、尺寸和温度制度都不一样, 控温精度基本相同。温度传感器的精度要求较高, 在 0℃ 的测温精度为 0.05℃, 高于快冻和慢冻用的温度传感器 0.5℃ 的要求。

5 规定超声浴槽的大小应与试件盒相匹配, 以确保试件盒与超声浴槽没有机械接触, 可通过在超声浴槽与试件盒之间注入一定量的水来保证无机械接触。市场上的产品可以满足本标准规定的功率要求。

6 超声波测试仪的频率范围为 (50~150)kHz, 与第 5 章动弹性模量测定仪的频率范围不同, 应注意区分。

7 剥落物收集器用于收集混凝土试件因盐冻破坏产生的剥落物。为防止锈蚀, 应采用不锈钢材料制作。为方便操作, 剥落物收集器应装有把手。

8 规定了超声波传播时间测量装置的尺寸和安装方法。要求超声波传感器安装在该装置两侧相对的位置上, 且离试件的测试面保持 35mm 的距离。这里测试面指接触试验液体 (即 3%

NaCl 溶液)的试件下表面。

9 试验液体采用质量百分比为 3%的 NaCl 溶液,可用 30g NaCl 和 970g 的蒸馏水配制而成。试验用 NaCl 为化学纯试剂即可。

10 要求烘箱能够稳定维持温度在 $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。

11 两种精度的天平,感量为 0.01g 的用于称量试件的剥落物质量,感量为 0.1g 的用于称量试件质量。

12 规定了游标卡尺的量程和精度。

13 PTFE 片的商品名称为聚四氟乙烯,一种塑料,英文名称为 Teflon。

14 由于单边冻融试验最低温度达到 -20°C ,且处于盐冻环境条件,故密封材料应具有抵抗低温、盐腐蚀和冻融破坏的能力。

4.3.4 本条规定了试件的制备、尺寸和数量要求。

1 在 RILEM TC 176: 2002 的 CIF (CF) Test 方法中,将边长为 150mm 的立方体试件沿聚四氟乙烯板切成 $110\text{mm} \times 150\text{mm} \times 70\text{mm}$ ($\pm 2\text{mm}$) 得到被测试件,本标准保留这种试件制作方法,因为边长 150mm 的立方体试件是我国抗压强度试验用标准试件,容易制备。一般来说,试件的长度应大于所采用的超声波波长,并应大于所使用骨料最大粒径的 2 倍~3 倍。对于未破坏的混凝土而言,在频率为 50Hz 时,其波长为 90mm,适应骨料最大粒径 30mm 左右。成型试件时可根据骨料最大粒径大小,在试模中间或两侧放置 PTFE 片。

2 混凝土强度较低时,可适当推迟在空气中带模养护的时间(如带模养护 2d),但试件的总养护时间(从加水算起)应控制为 7d。

3 规定了标准试件和非标准试件的切割方法和尺寸要求。非标准试件主要是针对构件或结构中切取的试件,这些试件不容易达到标准试件的尺寸要求,有时会遇到形状不规则的试件。从构件或结构中制取的试件,测试表面应为实际结构或构件的自然

表面。本标准规定的标准试件尺寸为 $150\text{mm} \times 110\text{mm} \times 70\text{mm}$ ($\pm 2\text{mm}$)。非标准试件的高度宜为 $(70 \pm 5)\text{mm}$ ，长高比应小于 3，一组 5 个试件的总表面积宜大于 0.08m^2 。

4 单面冻融试验的试件数量 5 个，这是经过统计学的推算并有助于获得有效试验结果的最低要求。5 个标准试件与溶液接触的总测试面面积为 0.0825m^2 ，故规定总测试面积不少于 0.08m^2 是可以满足的。

4.3.5 本条规定了单面冻融试验的步骤。

1 试件从养护室取出来后的干燥时间为 21d，此时试件的实际龄期为 28d (7d 养护 + 21d 干燥)，干燥条件与本标准第 8 章收缩试验要求的环境条件相同。为保证干燥效果，要求试件侧立并相互间隔 50mm。

2 试件的密封很重要。只有对所有侧面密封，才能防止侧面发生剥落，保证试件处于单面吸水状态，否则在冻融的过程中有可能因为侧面的剥蚀而对试验结果产生影响。密封有两种方式；一是在试件进行吸水前 3d，在试件的侧面紧紧地胶粘一层 20mm 厚涂有异丁橡胶的铝箔；二是用可溶的环氧树脂对试件侧面进行密封，但不得污染试件的顶部和底部表面。为保证密封效果，试件应保持干净和干燥。

3 在向试验容器中添加试验液体（即质量百分比为 3% 的 NaCl 溶液）时，应防止溅湿试件顶面，以保证试件处于毛细吸水状态。预吸水阶段应盖上容器盖子，以防止蒸发，但要同时防止冷凝水滴落在试件上表面。

4 将试件从试件盒中取出等各种操作时，应始终将试件的测试面朝下，这是为了防止试验液体湿润上表面，同时不能损伤试件的密封材料。测量超声波传播时间初始值时应测量两个传播轴上的传播时间，传播时间在计算相对传播时间和动弹性模量时会用到。每个传播轴上的传播时间以测量得到的最小时间为准，可通过微调试件的位置来实现。应对初始传播时间的测量位置做好标记，以便在后续试验中采用。计算超声波穿过试件的长度

时，不应将侧面密封材料的厚度计入。

5、6 单边冻融试验时试件的安放可参考本标准图 4.3.3-1 和图 4.3.5。单面冻融循环试验时，应该去掉试件盒的盖子，这与预吸水时盖上盖子是不同的。但试件盒之间的接缝处必须密封，使试件上表面的空气层与试件盒底部的冷冻液隔离。进行单面冻融时，试件的实际龄期已经达到 35d（从试件加水成型开始计算，7d 养护+21d 干燥+7d 预吸水）。

7、8 规定每 4 个循环对试件进行一次测量，测量的内容包括：试件剥落量、试件吸水量、超声波传播时间。

剥落物的收集采用超声波方法，将试件上的剥落物先清除到剥落物收集器中。注意图 4.3.3-5 超声浴是专用装置，与图 4.3.3-6 的超声波传播时间测量装置不同。称量剥落物应加上进行超声浴之前，在冻融过程中进入试验液体中的剥落物，溶液中剥落物采用过滤方法提取。收集的程序为先对试件进行超声浴，然后将试件从超声浴中取出，放入剥落物收集器（不锈钢盘）中；再将试件放入测量超声波传播时间的装置，对试件进行超声波传播时间测量，每次测量超声波传播时间的试件位置和方向应与测试初始超声波传播时间所确定的试件位置和方向相同；将钢盘上的剥落物一起冲洗到装有试验溶液的容器中；最后将收集到全部剥落物的试验溶液进行过滤、干燥、称量，即可得到剥落物的质量。

测量完试件的超声波传播时间后，需要将试件放入另一个试件盒中，因为装被测试件的前一个试件盒中的溶液需要进行过滤，容器需要重新清理、重新添加溶液等。

9 单面冻融试验停止的条件有三个：达到 28 次冻融循环；试件表面剥落量大于 $1500\text{g}/\text{m}^2$ ；试件的超声波相对动弹性模量降低到初始值的 80% 以下。满足三个条件中任何一个，即可停止试验。

水的温度及试件侧面上存在的气泡会对超声传播时间造成影响，因此必须加以注意。

4.3.6 本条规定了试验数据的计算和处理方法。

1~3 计算 n 次冻融循环后每个试件剥落物的总质量时，应对每个试件在各次测试间歇得到的剥落物质量进行累加。

4、5 吸水率的计算是以试件饱水后的质量为计算基础，相当于饱和面干状态。

6 超声波传播时间的相对变化即为冻融前后超声波在试件中的传播时间之比。

计算超声波相对动弹性模量时，试件密度、尺寸、泊松比的变化可以忽略。试验中采用传播时间作为相关参数时，对这些数据的要求并不是非常严格。超声波动弹性模量并不是一个工程学上的物理量，只作为参考，但用相对动弹性模量代替传播时间的相对变化，可以更加方便地表征试件的内部损伤。

吸水率、超声波相对传播时间和超声波相对动弹性模量等参数与试件的内部损伤一般有表 1 中的对应关系。

表 1 吸水率、超声波相对传播时间和超声波相对动弹性模量等参数与试件的内部损伤的对应关系

混凝土损伤	轻微损伤	中等损伤	严重损伤
超声波相对传播时间 (%)	>95	95~80	80~60
超声波相对动弹性模量 (%)	>90	90~60	<60
混凝土吸水率 (%)	<0.5	0.5~1.5	>1.5

5 动弹性模量试验

5.0.1 本条规定了动弹性模量试验适用范围和目的。

本标准参考了美国 ASTM C215 等国外标准以及国内公路、水工等行业标准,这些标准规定的方法基本一致。

动弹性模量测定,目前主要用于检验混凝土在各种因素作用下内部结构的变化情况。它是快冻法试验中检测的一个基本指标,因此列入耐久性测定的范畴。

动弹性模量一般以共振法进行测定,其原理是使试件在一个可调频率的周期性外力作用下产生受迫振动,如果这个外力的频率等于试件的基频振动频率,就会产生共振,试件的振幅达到最大,这样测得试件的基频频率后,再由质量及几何尺寸等因素计算得出动弹性模量值。

本试验方法测试动弹性模量与单面冻融试验方法中测试动弹性模量所用仪器不同、原理不同、结果不同,应注意区分。

5.0.3 本条规定了动弹性模量试验所用设备应满足的基本要求。

1 敲击法测定动弹性模量虽然是近年发展起来的一门新技术,但是目前国内使用较少,因此,本标准未将其列入。进行混凝土动弹性模量测定时,常用试件的频率范围一般为 100Hz~10000Hz,本方法对测量仪器提出的频率范围是现有产品所能达到的检验范围。

共振法混凝土动弹性模量测定仪一般在市场上都能够买到专用产品,所以取消了原标准采用通用仪器组合的方法。

2 为了减少试验误差,试件支承体采用厚度约 20mm 泡沫塑料垫。为了使各单位采用的试件支撑体材料的材质具有一致性,规定了宜采用表观密度为 $(16\sim18)\text{kg/m}^3$ 的聚苯板。

3 案秤的称量由原标准的 10kg 改为 20kg, 因为高强混凝土试件的质量大多超过 10kg。将“案秤”名称改成“称量设备”, 以扩大设备的选择范围。

5.0.4 本条规定了动弹性模量试验的操作程序和步骤。

1 动弹性模量参数计算需要用到试件的质量和尺寸参数, 故应该准确测量。

2 动弹性模量一般采用纵向振动和横向振动两种测定形式。不少单位的使用经验表明, 纵向法所得测量结果的稳定性和规律性都较差, 故在本标准中仅列横向振动法作为确定动弹性模量的标准方法。

3、4 目前生产的共振法动弹性模量测定仪一般装有指示电表及示波器两个指示机构, 但由于试件存在阻尼, 往往不能同时指示出共振点, 有时两者会相差 (3~4)% 之多。为了统一起见, 本标准规定示值以电表为准, 示波器图形作为参考。当电表示值达最高点时即可认为已经达到共振状态, 示波器图形仅要求呈闭合的椭圆形即可。

目前市场上好的动弹性模量测定仪已经实现数字化显示, 可自动调整共振频率, 使用更为方便。

5.0.5 本条规定了动弹性模量的计算方法。

本次修订将原标准中计算公式的系数合并为一个。原标准中计算动弹性模量时, 在计算式中纳入试件尺寸修正系数 K 。根据机械振动理论该 K 值为:

$$K = 1 + 6.585 \times (1 + 0.752\mu + 0.810\mu^2)(h/L)^2 \\ - 0.868(h/L)^4 - 0.8340 \times (1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2)(h/L)^4 \\ \div [1 + 6.338(1 + 0.14081\mu + 1.536\mu^2)(h/L)^2] \quad (1)$$

其中 μ 为材料的泊松比。据试验, 混凝土在 $\sigma = (0.3 \sim 0.5)f_{\text{c}}$ 的范围内, 泊松比为 0.12~0.18。本标准采用 $\mu=0.15$, 算出 L/h 分别为 3、4、5 三种常用跨高比的 K 值, 供计算时使

用。本标准由于试件尺寸固定为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，试件的跨高比是固定的，计算的修正系数 K 可以直接得出，因此，本标准动弹性模量计算式中没有修正系数 K 。但采用长宽比为其他参数的试件时，可参照上述公式计算修正系数。

6 抗水渗透试验

6.1 渗水高度法

6.1.1 本条规定了渗水高度法的适用范围和目的。

渗水高度法可以通过渗水高度直接计算出相对渗透系数，故有些标准称为相对渗透系数法，二者在本质上是一致的。国外比较倾向于用渗水高度及相对渗透系数来评价混凝土抗渗性，我国也已经逐渐积累了这方面的经验，并且设备质量和水平有了较大提高。《水工混凝土试验规程》DL/T 5150 和《水工混凝土试验规程》SL/T 352、《公路工程水泥及混凝土试验规程》JTG 3420、《水运工程混凝土试验检测技术规范》JTS/T 236 等行业标准均列入或保留了渗水高度法或相对渗透系数法，一般用于抗渗等级较高的混凝土。

6.1.2 本条规定了渗水高度法使用的试验设备。

1 渗水高度法采用的水压力为 1.2MPa，因此规定混凝土抗渗仪的最大水压力不低于 2.0MPa，这样实际施加的水压力不超过设备能施加最大水压力的 60%，比较合理和经济。该仪器也可直接用于逐级加压法（抗渗等级的试验）。

3 本标准规定了两种以上的密封材料，关键是要保证密封效果。目前有研究表明，采用橡胶密封圈可使操作更加简单和方便。

4 梯形板主要为了方便测量渗水高度而使用。

5 钢尺用于测量渗水高度。

6~8 钟表、辅助设备和加压设备也是逐级加压法需要的工具和设备。如采用橡胶圈密封，则不需要烘箱、电炉等设备。

6.1.3 本条规定了渗水高度法抗水渗透试验的步骤。

6.1.4 本条规定了渗水高度试验结果的计算和处理方法。

不同于欧洲标准中渗水高度取最大渗水高度,本标准规定渗水高度取 10 个测点的平均渗水高度,与我国交通、电力、水利、水运等行业标准规定一致。

6.2 逐级加压法

6.2.1 本条规定了逐级加压法的适用范围和目的。

逐级加压法尤其适用于抗渗等级较低的混凝土抗水渗透试验。

我国设计人员在设计混凝土抗渗性指标时,几乎所有的工程设计都使用抗渗等级,即以逐级加压法测试指标作为混凝土抗渗性的特征指标,而且国内相关标准如《混凝土结构设计规范》GB 50010、《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057、《轻骨料混凝土技术规程》JGJ 51、《地下防水工程质量验收规范》GB 50208、《给水排水工程构筑物结构设计规范》GB 50069、《混凝土质量控制标准》GB 50164 和众多的其他行业标准、地方标准等,均引用本方法所测的抗渗等级指标。另外,本方法在我国使用非常普遍,为大家所熟知,并已积累了非常丰富的经验和大量的数据。因此,本标准保留了逐级加压法。但近年来的大量实践表明,逐级加压法在应用于设计抗渗等级较高的高强混凝土时,试验耗时较长,无法快速有效地反映高强混凝土的抗水渗透性能,作为高强混凝土设计指标的控制意义相对较弱,故基于逐级加压法测试的抗渗等级指标不宜作为 C40 及以上强度等级混凝土的设计指标,这一点在工程设计时应予以考虑。

6.2.2 目前抗水渗透试验的设备水平已有了较大提高,自动化抗水渗透试验设备能够实现试件密封、加压持压、渗水检测等全过程的计算机自动处理与采集,并且能够实现一机多线控制多组试验,能够显著提高试验效率,减轻试验负担,同时保证试验操作的准确性。

6.2.3 本条规定了逐级加压法试验的步骤。

1 本方法规定的试件准备和处理等试验程序和步骤，与渗水高度法相同。

2 试验过程中要求每 8h 变化一次压力，直至有 3 个试件渗水为止，或加至规定压力（设计抗渗等级）在 8h 内 6 个试件中表面渗水试件少于 3 个时，即可停止试验。与渗水高度法一样，试验中也需要随时观察试件周边是否渗水。

6.2.4 本条规定了逐级加压法测试混凝土抗渗等级的确定方法。抗渗等级对应的是 2 个试件渗水或 4 个试件未出现渗水时的最大水压力值的 10 倍。

本标准公式（6.2.4）有关抗渗等级的确定可能会有以下三种情况：

1 当一次加压后，在 8h 内 6 个试件中有 2 个试件出现渗水时（此时的水压力为 H ），则此组混凝土抗渗等级为：

$$P = 10H \quad (2)$$

2 当一次加压后，在 8h 内 6 个试件中有 3 个试件出现渗水时（此时的水压力为 H ），则此组混凝土抗渗等级为：

$$P = 10H - 1 \quad (3)$$

3 当加压至规定压力或设计指标后，在 8h 内 6 个试件中表面渗水的试件少于 2 个（此时的水压力为 H ），则此组混凝土抗渗等级为：

$$P > 10H \quad (4)$$

7 抗氯离子渗透试验

7.1 快速氯离子迁移系数法 (RCM 法)

7.1.1 本条规定了 RCM 法试验的目的和适用范围。

本方法以 NT BUILD 492 - 1999.11 中非稳态迁移试验得到的氯离子迁移系数法为蓝本进行了适当修改,基本为等同采用。

目前该方法在我国众多科研和工程单位得到了应用,已经积累了较丰富的经验,而且已经开发出有关试验仪器设备,并制定了相应的产品标准《混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262。

这种非稳态迁移方法测量得到的氯离子迁移(扩散)系数不能直接与用别的方法(如非稳态浸泡试验和稳态迁移试验方法)测量得到的氯离子扩散系数进行比较。

7.1.2 本条规定了 RCM 法抗氯离子渗透试验所用的仪器、设备、化学试剂和溶液。

1 试剂主要是 5 种:蒸馏水、氢氧化钠、氯化钠、硝酸银、氢氧化钙。前 3 种与电通量法所用试剂相同。

2 规定了 RCM 法抗氯离子渗透试验需要的仪器设备。

1)~3) 和 16)、17) 切割设备和真空装置与电通量法所需要的设备可以通用。真空容器可自行设计,能够容纳 3 个以上试件并能与真空泵相匹配即可。采购真空泵时必须注意其抽真空能力应符合本标准要求。

4) RCM 测定装置在市场上已经有不同型号的商用产品。本次修订增加要求不同试件所在阴极试验槽相互隔开的条文,避免同一阴极试验槽中盛放多个试件对试验结果造成影响。

5)~12) 和 14) 与电通量法试验需要的工具可以通用。

13) 扭矩扳手主要是拧紧环箍用。

3 规定了试验用溶液和指示剂的要求。

- 1) NaCl 溶液质量百分比为 10%，与电通量法试验所用的 3%不同。NaOH 溶液浓度为 0.3mol/L，与电通量试验用的 NaOH 溶液浓度相同。
- 2) 显色指示剂采用针对氯离子具有显色反应的 AgNO_3 溶液。

7.1.3 本条规定了试验室的温度条件，一般都能满足。

7.1.4 本条规定了试件的制作方法。

- 1 试件的形状统一为圆柱体。

- 2 规定可使用两种模具成型试件。

- 3 进行抗氯离子渗透试验的龄期为 28d。由于大掺量矿物掺合料的应用愈发普遍，对于提高后期混凝土抗氯离子渗透能力有积极作用，因此试验龄期也可以根据设计要求调整为 56d 或 84d。

- 4 试件的制作和准备时应注意区分成型面、浇筑面。制作不同高度的抗氯离子渗透试验用试件时，其暴露面有所不同。

- 5 试件加工后应打磨光滑，去除表面杂物，使试件表面平整和便于安装。试件表面处理光滑后再测量其尺寸。

- 6 规定加工好的试件应继续在水中养护，以确保试件处于饱水状态。

7.1.5 本条规定了试件准备和安装方法。

- 1 真空泵应能保证真空容器的绝对压力在 5min 内达到 (1~5)kPa，选购真空泵时要注意其抽真空的能力。另外，能否达到规定的真空能力还与真空装置的密封性能有关，故安装真空装置时一定要保证密封，并采用专门的真空管与真空泵相连。

浸泡试件用的是饱和氢氧化钙溶液，这与电通量法使用蒸馏水或去离子水作为浸泡溶液是不同的，操作时应注意这一点。

- 2 将试件表面清理干净以便安装到环箍中。

- 3 清理试验槽以便注入试验溶液。清洗试验槽用室温凉开水即可。

- 4 安装试件时密封很重要。紧固试件用的环箍可以自行

加工。

5 阴极溶液为 10% 的 NaCl 溶液，可采用 100g NaCl 和 900g 蒸馏水配制，接近 2mol/L 的摩尔浓度。

6 电源连线正确很重要。电源负极连接到浸泡在 NaCl 溶液中的阴极板上，电源正极连接到浸泡在 NaOH 溶液中的阳极板上。

7.1.6 本条规定了试件在试验槽安装完毕后的电迁移操作方法。

1 初始电流统一以 30V 电压为基础来确定。

2 根据初始电流调整电压，按照调整后的电压记录新的初始电流，根据新的初始电流确定试验持续时间。试验的持续时间与通过试件的电流有关，电流大，持续的时间短，电流小，持续的时间就长。

3 记录阳极电解液（注意不是阴极电解液）中的初始温度，迁移系数的计算会用到此参数。

4 记录阳极电解液的最终温度，用于计算迁移系数。记录最终电流，用于分析电流变化情况。

5 规定试验结束后应仔细清理试验设备和用具，是为了防止生锈和便于保存。

7.1.7 本条规定了氯离子渗透深度的测试方法。

1、2 拆卸试件按照安装试件相反的顺序进行，可使用一个木制圆棒协助将试件从橡胶套中取出来。

3、4 氯离子显色分界线对应的氯离子浓度约为 0.07mol/L。不同的观察者测量氯离子渗透深度的结果可能有所差异，但其误差通常在可接受的范围内。

5~7 将劈开后的试件分为 10 等份，为消除边界效应的影响，通常只需要测量内部 6 等份（7 个测点）的氯离子渗透深度即可。为了消除因不均匀饱水或可能的渗漏引起的边缘效应，一般不测量试件边缘 10mm 以内的显色深度。

测量氯离子渗透深度只需要使用劈开后的试件一半。另外一半可根据研究需要，用来测量氯离子含量或浓度分布。测量氯离

子含量或浓度分布通常可采用钻取粉末，然后溶于酸或蒸馏水中，采用化学滴定方法分别测量得到酸溶性氯离子含量（总氯离子含量）或水溶性氯离子含量（自由氯离子含量）。

7.1.8 本条规定了试验结果的计算和处理方法。

通常可以按式（7.1.8）计算氯离子迁移系数。需要精确计算时，可以按下列公式进行计算：

$$D_{\text{RCM}} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{X_d - \alpha\sqrt{X_d}}{t} \quad (5)$$

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (6)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (7)$$

式中： D_{RCM} ——非稳态迁移系数（ m^2/s ）；

z ——离子化合价的绝对值，取 1；

F ——法拉第常数 [$\text{J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$]，取 $9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$ ；

U ——所用电压的绝对值（V）；

R ——气体常数 [$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$]，取 $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ ；

T ——阳极溶液初始温度和结束温度的平均值（K）；

L ——试件厚度（m）；

X_d ——氯离子渗透深度的平均值（m）；

t ——试验持续时间（s）；

erf^{-1} ——误差函数的逆函数；

c_d ——氯离子颜色改变的浓度（mol/L），普通混凝土取 0.07mol/L；

c_0 ——阴极溶液中氯离子浓度（mol/L），取 2mol/L。

由于 $\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \times 0.07}{2} \right) = 1.28$ ，可简化为式（7.1.8）。

7.2 电 通 量 法

7.2.1 本条规定了电通量法的试验目的和适用范围。

本方法是在 ASTM C1202 混凝土抗氯离子渗透性试验方法基础上修改而成,也称为直流电量法(或库仑电量法、导电量法),是目前国际上应用最为广泛的混凝土抗氯离子渗透性能的试验方法之一,积累了大量的宝贵数据和经验。实践证明,该方法对于大多数普通混凝土是适用的,而且与其他电测法有较好的相关性,在大多数情况下,相同混凝土配合比的电通量测试结果与氯离子浸泡试验方法(如 AASHTO T259)的测试结果具有很好相关性。至今,ASTM C1202 先后经历多个版本,本次修订也参考了 ASTM C1202 的历次修订内容。

根据 ASTM C1202 的规定,对于已经利用本方法与长期氯离子浸泡试验方法建立相关性的各种混凝土,本试验方法均适用。

本方法用于表面经过处理的混凝土时,例如采用渗入型密封剂处理的混凝土,应谨慎分析试验结果,因为本方法测试该类混凝土显示具有较低抗氯离子渗透性能,而采用 90d 氯离子浸泡试验方法测试对比混凝土,却表现出较高抗氯离子渗透性能。

养护龄期对试验结果有重要影响,大多数混凝土如果养护得当,随着龄期增加,其渗透性显著降低,因此分析试验结果时应考虑试验龄期的影响。

当混凝土中掺加亚硝酸钙时,本方法可能会导致错误结果。用本方法对掺加亚硝酸钙的混凝土和未掺加亚硝酸钙的混凝土对比测试,结果表明掺加亚硝酸钙的混凝土有更高库仑值,即具有更低的抗氯离子渗透性能。然而长期氯离子浸泡试验表明,掺加亚硝酸钙混凝土的抗氯离子渗透性能高于对比混凝土。

影响混凝土抗氯离子渗透性能的因素有水灰比、外加剂、龄期、骨料种类、水化程度和养护方法等,采用本方法试验结果进行比较时,应注意这些因素的影响。

7.2.2 本条规定了试验采用的仪器、设备、试剂以及用具的有关要求。

1 实际采用的试验装置，在精度满足要求和符合本标准测试原理的情况下可自行设计。但宜采用自动测试电通量的装置，以减少和避免人为操作引起的误差。目前市场上已经有不同型号的商用产品，也已制定电通量测定仪的产品标准《混凝土氯离子电通量测定仪》JG/T 261。

2 主要的仪器设备和试剂与 ASTM C1202 基本相同。

1) 直流电源应能够稳定输出 60V 电压、精度 0.1V 的要求。电流在 (0~10)A 范围内，可与 RCM 法通用电源。

2) 试验槽或电解槽一般采用耐热有机玻璃制作。由于电通量试验使用的标准试件直径为 100mm，试验槽凹陷处最大直径应比试件直径大 1/8，即凹陷处最大直径约为 112mm 比较合适。

3) 紫铜板用于固定铜网并提高导电性，不能缺少。

4) 标准电阻用于检测通过试件的电流，实际检测的是标准电阻上的电压，由于电阻为 1Ω，所以试件上的电压与通过试件的电流数值是相同的。

5)、6)、12) 组成抽真空装置，与 RCM 法的抽真空装置可以通用。

7) 阴极溶液为 3% 的 NaCl 溶液，这与 RCM 法不同，RCM 法阴极溶液为 10% 的 NaCl 溶液。温度会影响溶液导电性和测试结果，因此需冷却至室温。

8) 阳极溶液为 0.3mol/L 的 NaOH 溶液，与 RCM 法的阳极溶液相同。配制 NaOH 溶液时会放热，温度会影响溶液导电性和测试结果，因此需冷却至室温。

9) 规定用于密封试件侧面（圆柱面）的密封材料采用硅胶或者树脂，一般能够达到密封效果，也可以采用其他更可靠的耐热耐腐蚀密封材料。

- 10) ASTM C1202 采用三种密封方法,前两种都是采用密封胶(分别为低黏度和高黏度)等材料对试件进行密封。采用低黏度密封材料时,需要将密封材料涂刷在铜垫片上,在铜网上垫滤纸,以免铜网粘上密封材料,此时试件的端部只有部分与溶液接触(约 76.2mm 直径范围内与溶液接触)。采用高黏度密封材料时,只密封试件的端部外表面与试验盒之间的部分(因有铜片存在,实际上也是直径约 76.2mm 范围内与溶液接触)。第三种为采用外径 100mm、内径 75mm 的硫化橡胶垫(垫片方式),溶液与试件端部接触实际上只有直径为 75mm 范围内的部分。三种方式得到的试件与溶液的接触面积基本相同。

由于密封胶方式操作比较复杂、时间长,而垫片方式操作简单,可操作性更强,本标准规定采用内径为 75mm 的硫化橡胶垫的密封方式。

- 11) 加工试件用切割设备与 RCM 法相同。

- 13) 温度计精度要求与 RCM 法相同。

7.2.3 本条规定了电通量法的试验步骤。

1 ASTM C1202 允许的试件为直径(95~102)mm、厚度 51mm,范围较大。考虑到我国混凝土试件的模具和操作方便,以及与 RCM 法能够通用模具,本标准规定试件为直径(99~101)mm、厚度(48~52)mm 的范围,与 ASTM C1202 的规定基本一致。

本试验未规定制作试件时允许使用的最大骨料粒径,研究表明骨料的最大粒径在工程常用的范围内(5mm~31.5mm),用同一批次混凝土制作的试样,其试验结果具有很好的可重复性。

试件在运输和搬动过程中应防止受冻或损坏。试件表面受到改动,比如做过粗糙处理,用了密封剂、养护剂,或其他形式表面处理时,必须经过特殊处理使试验结果不受这些改动的影响,可切除改动部分,以消除表面影响。

由于试验结果是试样电阻的函数，试件中的钢筋和植入的导电材料对试验结果有很大影响，要注意试件中是否含有这种导电材料。当试件中存在纵向钢筋时，因为在试件的两个端头搭接了一个连续的电路通道，可能损坏试验装置，这种试验结果应作废。

2 规定试件侧面应密封好，以防止试件侧面失水和导电等。

电通量试验一般在 28d 龄期进行。掺合料较多的混凝土在 28d 龄期时，掺合料的作用不能得到充分反映，允许在 56d 龄期进行试验。设计有龄期规定时，可按设计要求的龄期进行试验。

3 真空饱水是保证各种试件处于相同或基本相同条件的关键步骤。

4 试件安装后，可向试验槽灌入蒸馏水或去离子水来检查装置是否密封好。条件不具备时，也可灌入冷开水来检查装置的密封情况。

5 灌注阴极和阳极溶液时应先在溶液槽或者试验槽上用防水笔做标记，以免操作时出错，然后按照标记分别将有关电极连接到电源的正负极上。

6、7 通过试件的电流是电通量方法测试的主要数据。如采用电流表，可直接根据电流表显示的读数记录电流值。也可采用万用表检测电流值。采用自动采集电流数据时，需要注意数据的精度和准确性。

测试期间，电池盒（即试验槽）中溶液的温度不能高于 90℃，以避免损坏加压池和导致溶液沸腾。一般可在加压电池顶部的 3mm 通气孔安装热电偶，通过它可监测溶液的温度。只有高渗透性混凝土才会出现高温现象。如果因高温而终止测试，应记录并写明时间，该混凝土归类为具有非常高的氯离子渗透性能。

9 规定试验环境温度为 (20~25)℃，一般具备恒温条件的试验室都能满足要求。

7.2.4 本条规定了试验结果计算和处理方法。

1 采用电流和时间曲线方式计算时，实际上是通过曲线进行积分或者按照梯形面积计算。

2、3 手工测量电流时，通常采用本标准规定的简化公式进行计算，其本质就是梯形面积积分。

需要注意的是，本标准以直径为 95mm 的试件为标准试件，所有电通量数据必须换算才能进行相互比较。换算的依据是通过试件的电通量与其横截面积成正比。

4 取值规则是以中值为基础。

8 收缩试验

8.1 非接触法

8.1.1 本条规定了非接触法试验的适用范围和目的。

由于混凝土品种增多以及矿物掺合料、外加剂等广泛使用,导致某些混凝土的早期收缩明显增大。混凝土早龄期(如前 3d)的体积变形最为复杂,包括全部塑性沉降收缩、自生收缩、水泥水化的化学收缩以及混凝土表面失水产生的干燥收缩。因此,若在试件标养 3d 后测量变形,只能测量从标准养护室移入恒温恒湿室起试件的长度变化,无法反映出早龄期 3d 之内的长度变化情况。

本标准规定了对混凝土自初凝开始的收缩变形测试。此时混凝土尚没有足够强度,因此宜采用非接触的方法测试其收缩变形。

非接触法收缩变形测量装置也可以用来测量自收缩,测量自收缩时要保证试件与外界无物质交换。

尽管非接触法收缩变形测量装置也可以测试混凝土后期收缩,但是由于非接触法收缩变形测量仪在测试过程中始终处于监测状态,如果采用此方法测试后期收缩,则一对位移传感器在整个长期测试期内(例如 28d、180d)只能固定用于测试一个试件,测试仪器利用效率很低,而位移传感器的价格往往较高,所以非接触法用于测试后期收缩很难被试验人员接受,一般只用于混凝土的早期收缩测试。

8.1.2 本条规定了非接触法收缩试验所用的试件尺寸。试件断面尺寸根据混凝土中最大骨料粒径来选择。通常情况下,100mm×100mm×515mm 的试件可以满足大多数试验需要,因此规定 100mm×100mm×515mm 为标准试件。

8.1.3 本条规定了非接触法有关仪器设备的要求。

1 本标准给出了非接触法收缩变形测定仪器的尺寸和原理示意图用于参考，也可自行设计，只要达到测试精度要求即可。

为了保证试验质量和水平，非接触法收缩变形测定仪应设计成整机一体化装置，且具备自动采集和处理数据的功能。试验期间为防止测试装置受到振动而影响试验结果，应采用固定式试验台，试件、传感器等应采用可靠方式固定于试验台上，例如采用磁力吸附装置固定于钢制试验台面上，或采用螺栓形式紧固于试验台面上。

2 试模是试验测试装置的一部分，因此试模的设计和加工质量非常重要，尤其是对反射靶的连接方式、位移传感器的固定方式应非常可靠。另外，试模的刚度和变形性能也对试验结果有影响。要求在本标准规定的试验条件下试模本身刚度足够大。

测量标距过短将使试件的收缩绝对值过小，不易读数，影响测试的准确度，所以本标准限制试件的测试标距不得小于 400mm。

3 非接触法所用的位移传感器有多种类型，比如激光测长仪、声能传感器、电涡流传感器等，传感器的安装方式也有多种，反射靶构造也可以不拘泥于一种，达到测试精度要求即可。

反射靶能否随着混凝土收缩而同步移动，将决定测试结果的真实性，以及测试方法的合理性和可行性。反射靶能否与混凝土同步工作取决于反射靶构造形式及埋设方式，本方法示意图中显示的仅是一种方式，也可以采取其他方式。

8.1.4 本条规定了非接触法收缩变形测量的步骤。

1 规定非接触法收缩试验应在恒温恒湿环境下进行，恒温恒湿环境与接触法要求的环境相同。由于试模是试验装置的一部分，因此非接触法混凝土收缩试验要求带模进行测试。

2 试件能否在试模内自由变形决定了测试结果的可靠性，因此要求试件能够在试模内自由变形。保证试件处于自由变形的的方法有多种，本标准推荐了塑料薄膜和 PTFE 片两种方法。

3 初凝试验和收缩试验应在同一地点进行。测定的时间间

隔可以在程序中自由设定，但间隔时间不宜超过 1h，以便得到较光滑的变形曲线。

5 当采用非接触法收缩变形测量装置测量自收缩时，应保证试件与外界无物质交换。理论上，可以用质量变化来反映有无物质交换，但是由于非接触收缩仪在整个测试过程中需要始终处于监测状态，不宜搬动试模及试件，所以往往无法通过测试质量变化来反映有无物质交换。实际操作中，通常是将浇筑后的试件以塑料薄膜等密封来保证无物质交换。

8.1.5 本条规定了非接触法收缩测试的结果计算和处理方法。

每个试件带两个测头，应分别进行读数。以 3 个试件的算术平均值作为混凝土早期收缩值。

非接触法主要用来测试 3d 以内的混凝土收缩值，3d 以后的收缩值采用接触法测试，所以规定作为对照的混凝土早期收缩值以 3d 龄期测试得到的收缩值为准。3d 龄期是以混凝土搅拌加水开始计算，但早期收缩从混凝土初凝或接近初凝开始测试。

8.2 接 触 法

8.2.1 本条规定了接触法收缩试验的适用范围。接触法适合测试除外力和温度变化以外的因素所引起的试件长度变化。

由于卧式混凝土收缩仪并非固定，采用同一台收缩测试仪对多个试件测试时，多次搬动试件等操作可能会扰动测试仪器从而造成误差，对操作人员的要求相对较高。但这种方法在我国已经使用多年，积累了大量的经验和数据，故本标准保留了采用卧式混凝土收缩仪的试验方法。

8.2.2 本条规定了接触法收缩试验所用试件和测头的要求。

1 接触法收缩试验所用试件尺寸与非接触法收缩试验基本一样，所不同的是非接触法为带模测试，而接触法是脱模后测试。

2 采用卧式混凝土收缩仪时，测头有两种样式，一种适用于预埋，一种适用于后埋（粘贴）。

3 采用立式混凝土收缩仪器时，试件的测头与卧式有所不同，应注意区别。

4 采用接触式引伸仪时，测钉不是在试件两端，而是粘贴在试件两个侧面的轴线上，这与卧式收缩仪对测头的要求不同。

5 不同收缩测定仪对测头位置的要求不同，因而对试模的开孔要求也不同。

6 接触法和非接触法收缩试验均要求混凝土表面不得有严重的脱模剂污染（自收缩测量可例外），以免影响试件与外界的水分交换，进而影响测试结果。本试验方法测量得到的实际上是干燥收缩和部分碳化收缩，这两种收缩的大小与试件内外水分交换方式有密切关系。成型试件时采用的机油类憎水性脱模剂会影响试件与外界的水分交换，故本标准规定不得使用。

8.2.3 本条规定了接触法收缩试验所用仪器设备的要求。

1 收缩测定仪要求有校正用的标准杆，这是获得正确测量数据的重要条件。

2 目前专用的混凝土收缩测量仪一般只能测定标距为540mm的标准试件（试件本身长度为515mm，两个测头外露长度总计为25mm，所以总标距为540mm），但在很多场合下还必须使用各种形式的非标准试件进行收缩测量，故本试验方法同时允许使用接触式引伸仪。接触法收缩变形测量装置通常指卧式收缩测定仪，本标准规定采用精度为0.001mm的千分表。采用其他形式的测量装置时，其精度应达到0.001mm。

8.2.4 本条规定了接触法收缩变形试验的步骤。

1 收缩试验的标准试验条件为：温度 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(60 \pm 5)\%$ ，即要求恒温恒湿。要求放置试件的试件架本身不能吸水，试件的放置间距不能影响试件与空气的正常水分或湿度交换。

2 国外标准对收缩试验中测定初始长度读数的龄期规定得都比较早，如美国 ASTM C157 要求 $(23 \pm 0.5)\text{h}$ ，日本 JIS A1129 要求24h，英国 BS1881:Part5 要求24h，欧洲 prEN480-3

要求水中养护 3d 后拆模立即测定初始长度。由于 1d 时混凝土强度还非常低，这些标准要求测定初始读数后仍然要将试件送回水池标准养护，到 28d 移入恒温恒湿室。为了保证 24h 拆模时不损伤预埋测头，还规定用特殊构造的试模及拆除端板的装置。

根据我国目前的情况，考虑到有低强度等级的混凝土（现在混凝土都掺较多的掺合料，早期强度通常不高）、预养温度不高以及部分后埋测头等情况，本标准规定一律在 3d 龄期测定初始长度读数。但混凝土拆模后必须在标准养护室养护到测定初始读数，否则将会有一部分收缩变形在测定初始读数以前就已经出现，影响试验的准确性。

由于我国收缩试验初始读数的龄期一直规定为 3d，已经积累了大量数据，考虑到标准连续性以及历史数据的可比性，本标准规定初始读数的试验龄期为 3d。

本标准规定收缩试验测试时间间隔为 1d、3d、7d、14d、28d、45d、60d、90d、120d、150d、180d 及 360d。

3 测量其他条件下的收缩值，应按照相应的试验条件进行。非标准条件养护的试件在恒温室进行收缩试验前，应先预置 4h，再测试初始读数，以保证试件温度与室温基本相同。试件温度与室温不同，可能影响后续的收缩试验结果。对于从标准养护室取出来的试件，因其温度与恒温室接近，故不必进行预置，可直接测量初始读数。

4 随时用标准杆校对仪表的零点，对于获得正确的试验结果非常重要。

5~7 收缩试验每次放置的位置和方向应一致，以减小试件放置带来的误差和便于快速测量读数。

8.2.5 接触法收缩试验结果的计算方法在本质上与非接触法一样，但计算公式的形式不同。

计算收缩测量值时，应注意试件测量标距的取值。测量标距应扣除测头长度，即为测头内侧的净距离。

本标准规定作为对照的混凝土收缩率，以 180d 龄期收缩率

为准。由于一般混凝土试件，在 360d 后干燥收缩基本完成，故本标准规定可以 360d 的收缩率作为终极收缩率。

8.3 波纹管法

8.3.1 本次修订纳入了波纹管法作为测定混凝土在无约束条件下早期自收缩性能的试验方法。波纹管法近年来在国内外研究中的使用较多，其采用轴向刚度远小于环向刚度的柔性塑料圆柱形波纹管，使混凝土试件与外界无物质交换，并将混凝土早期体积变化转化为长度变化，可实现从浇筑成型后即开始进行自收缩的连续监测，而且能有效避免重力、温度变化以及模具约束对测试结果的影响。本标准波纹管法是参考美国 ASTM C1698 修改而成。本方法试验结果受混凝土拌合物状态影响显著，试验时应确保混凝土没有离析、泌水的情况；在进行对比试验时，应保证基准组与对比组的混凝土拌合物状态基本一致。

8.3.2 本条规定了波纹管法试验设备的有关要求。

1 规定了波纹管的材质与构造。首先要保证内部浆体与外界无物质交换；其次，波纹管轴向刚度应该较小，能最大程度上降低浆体变形时受到的波纹管约束，从而均匀地将混凝土变形传递到测量装置；此外，波纹管的波纹端部构造应为尖角状，并在环向具备足够大的刚度，防止测试过程中管内混凝土的自重把波纹压扁，导致摩擦增大。与美国 ASTM C1698 不同的是，本方法测试对象为混凝土，粗骨料粒径较大，故增大了波纹管内外径尺寸。

2 密封端塞宜使用具有一定刚度且自重较轻的材质，以防止波纹管端部下垂，影响与测量装置的对中接触。本标准给出了密封端塞示意图用于参考，也可自行设计，但要实现密封牢靠，与波纹管内浆体紧密接触，并能满足波纹管固定装置和测试装置的要求。

3 测试支架的支撑杆表面应尽可能处理得光滑，以降低与波纹管之间的摩擦。测试支架与波纹管一端可采用螺栓连接、磁

铁吸附等方式完全固定，在试验过程中不发生相对位移。试验期间应防止测试支架受到振动而影响试验结果。

4 美国 ASTM C1698 采用千分表作为测量装置，而非接触法混凝土收缩变形测定仪可以自动采集数据，测试更为方便。本标准同时允许使用这两种测量装置，可根据具体条件进行选择。

8.3.3 本条规定了波纹管试件制作的有关要求。

1 在振动成型过程中，密封端应密封牢靠，不被振离管端以致漏浆。

2 与常规模具相比，波纹管的构造更为复杂，因此本标准规定采用插捣与振动成型相结合的方式，保证试件成型密实，气泡尽量排出，以实现混凝土与波纹管的协同变形。装填完毕后，波纹管装料端必须完全密封，必要时可采用包裹薄膜等辅助密封方式。

装填波纹管时，应注意维持波纹管初始长度，可以手动维持管长，也可以设计专门的装置辅助波纹管样品成型。

波纹管是否完全装满将显著影响混凝土与波纹管的协同变形。因此，在保证波纹管长度不被拉伸或压缩的前提下，应在成型时尽可能装满波纹管。

3 波纹管密封后应尽快完全清理表面的浆体，防止其硬化后影响波纹管变形。

8.3.4 本条规定了波纹管法的试验步骤。

1 波纹管法同样以混凝土初凝时间作为测试起点，因此需要在同条件下同步测试混凝土的初凝时间。

3 支撑杆涂刷润滑剂的目的是尽量减小摩擦，防止影响波纹管变形。

8.3.5 波纹管法试验结果的计算和处理方法在本质上与非接触法相同。

9 早期抗裂试验

9.0.1 本方法是评价混凝土抗裂性能的试验方法，模拟工程中钢筋限制混凝土的状态，更加贴近工程现场的实际情况。近年来的实践表明，本方法尤其适用于评价纤维对混凝土早期抗裂性能的影响，以及评价混凝土构件在大风不易覆盖养护环境中及约束条件下的早期抗裂性能。此外，本方法试验结果受混凝土拌合物状态影响显著，试验时应确保混凝土没有离析、泌水的情况；在进行对比试验时，应保证基准组与对比组的混凝土拌合物状态基本一致。

9.0.2 本条规定了早期抗裂试验方法的装置以及对试件尺寸、每组试件个数、骨料最大粒径的要求。

1 试件采用平板型。因抗裂试件使用的混凝土量较大，试模占地较多，故规定每组 2 个试件即可，当然也可用 2 个以上的试件进行试验。

2 试验装置可按本标准规定的尺寸自行设计，市场上也有定型产品可供选择。加工抗裂试模或者装置，应保证其刚度和可拆卸性，以保证试验效果，并便于重复使用和维护。应确保裂缝诱导期的端部为尖角状，不得采用折弯的钢板作为裂缝诱导期，以免影响裂缝诱导作用。

3 试验用风机以能够连续调节风速为宜，且应具备适宜尺寸的风道，为平板试件提供稳定速度的气流。

4 本试验采用三种传感器：温度计、湿度计和风速计。市场上已有将三种传感器集成在一起的产品。

5~7 规定了裂缝宽度和长度的测量工具的量程和精度要求。

9.0.3 本条规定了早期抗裂试验的步骤。

1 试验在恒温恒湿室进行，以保证试验条件一致。

2、3 试件成型制作时需注意混凝土密实性、平整度和试件厚度，试件太厚和太薄均影响试验结果。

4 风速可采用手持式风速仪进行测定。同时应注意风向要求，以保证试验条件的一致性。

5、6 开始测读裂缝的时间统一规定为 24h。从混凝土搅拌加水开始计算时间，通常 24h 后裂缝即发展稳定。

验证试验表明，由于采用刀口诱导开裂，裂缝基本为直线。多数刀口上只有一条裂缝，个别刀口上有两条裂缝，一般情况下两条裂缝也基本处于同一直线上，此时可将两条裂缝的长度分别测量后相加，折算成一条裂缝的长度。裂缝的宽度以最大宽度为准。

规定裂缝长度采用钢尺测量，裂缝宽度采用读数显微镜测量，显微镜放大倍数至少 40 倍。这种显微镜市场上容易采购，价格便宜，精度能够满足要求。

7 需要计算的开裂指标有 3 个：平均开裂面积、单位面积的裂缝数目、单位面积上的总开裂面积。

9.0.4 本条规定了早期开裂试验结果计算及处理方法。

1 计算裂缝面积时，裂缝形状近似按三角形处理，故公式中有系数 $1/2$ 。

2 一般采用单位面积上的总开裂面积来比较和评价混凝土的早期抗裂性能。

10 受压徐变试验

10.0.1 本条规定了受压徐变试验的适用范围和目的。

10.0.2 本条规定了徐变试验仪器设备的有关要求。

1 规定了徐变仪的有关要求。

1) 徐变仪有多种形式,仪器的加载能力及稳定性是重要参数。

2) 国内外绝大多数采用弹簧持荷式徐变仪,长期使用证明这种形式具有简单、可靠及占地少等优点,故在本标准中予以采用。目前国内采用的弹簧持荷式徐变仪的具体结构、尺寸、层数有所不同,但只要构造及制作合理,测试的精度及准确性不会有太大差异。因此在本标准中不规定具体的构造形式和尺寸,只对丝杆及弹簧做了一些规定。随着高强混凝土的应用,对徐变仪工作荷载范围的要求提高。当需要测试高强度、大尺寸的试件时,徐变仪的工作荷载范围可能超过 800kN。

3) 对丝杆及弹簧提出要求是为了使徐变仪在整个试验过程中有较好的持荷及调整能力。为了减少徐变仪在试验过程中发生应力松弛,要求丝杆的工作应力尽可能低,弹簧的工作压力不应超过允许极限荷载的 80%,但也不得选用吨位过大的弹簧。如果加荷时弹簧的压缩变形太小(如 20mm 以内),则试验过程中试件所产生的变形将会造成很大的应力损失。弹簧过硬,其调整能力就较差。

4) 规定了液压持荷部件的构成。

- 5) 国内一般最多串叠 2 个试件, ASTM C512 允许串叠 3 个~5 个试件。按照 5 个 300mm 高的试件串叠计算, 并考虑上下两头的垫块高度, 上下压板之间的总距离不得超过 1600mm。

2 规定了加荷装置的结构要求。加荷装置一般由加荷架、油压千斤顶、测力装置等组成。

3 规定了变形测量装置的要求。变形测量一般以外装式(如带接长杆的千分表)或内埋式的量测装置为好。便携式的接触式引伸仪对仪器本身、测试人员的技术水平及测点的安装等要求较高, 使用时应注意。

10.0.3 本条规定了受压徐变试验对试件的要求。

1 规定了试件的形状和尺寸。

1) 本标准要求只采用棱柱体试件。国内外标准中一般要求试件截面尺寸至少为粗骨料最大粒径的 3 倍, 且不小于 100mm。建工行业一般采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的试件。

2) 参考 ASTM C512 的规定, 当试件叠放时, 在每叠试件端头的试件和压板之间应加装一个辅助性混凝土垫块, 以使得该叠试件的端部约束条件一致。根据有关研究成果, 棱柱体试件承压面约束区为距离端面 $a/2$ 的范围 (a 为试件边长), 故规定试件长度应比测量标距长出一个截面边长。

2 规定了试件的数量要求。

1) 规定同时制作至少 3 种试件: 抗压试件、徐变试件、收缩试件, 分别供确定荷载大小、测定徐变变形和测定收缩变形之用。

2) 规定收缩试件与徐变试件安装相同的变形测量装置, 确保测量精度相同。

3 规定了制备试件的要求。

- 1) 徐变试件受压面之间的平行度及受压面与纵向表面的垂直度对试件加载时的对中有明显影响,为此需重视试模选择、成型、试件后处理等有关环节。
- 2) 规定了角度公差。
- 3) 规定了外装式应变测量装置对试件和试模的要求。
- 4 规定了试件养护和存放方式。
 - 1) 规定三种试件在相同条件下进行养护,使三种试件的试验条件一致。
 - 2)~5) 国外标准一般给出 2 种~4 种试件养护和存放方式。现行行业标准《水工混凝土试验规程》SL/T 352 和《水工混凝土试验规程》DL/T 5150 规定只采用基本徐变养护方式(绝湿徐变),因为水工混凝土大多为大体积混凝土,内部接近绝湿状态。本标准规定了 4 种养护和存放方式:标准环境、绝湿环境、特定温度环境和其他条件。

对于 3d 龄期加载的试件,标养时间为 3d。对于在 7d 以上龄期加载的试件,标养时间均为 7d,其他时间都放在温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,湿度为 $(60\pm 5)\%$ 的环境中待试。

10.0.4 本条规定了受压徐变试验的要求。

1 规定了加荷龄期。ASTM 规范中要求加荷龄期为 2d、7d、28d、90d 和 360d,现行行业标准《水工混凝土试验规程》SL/T 352 和《水工混凝土试验规程》DL/T 5150 的要求与之相近。由于近年来桥梁工程施加预应力的时间多为 $(3\sim 5)\text{d}$,建筑施工中拆模龄期也普遍提前,故宜增加一组早龄期加载的试件(14d)。

2 规定了受压徐变试验的操作步骤。

- 1)、2) 规定了徐变试件安装的准备工作。需要施加的徐变应力大小由棱柱体试件的抗压强度决定,故在徐变试件加载前,应先取得棱柱体抗压强度数据。

- 3) 要求覆盖参比用收缩试件的端部,以防止收缩试件端部失去水分。
- 4) 徐变试验加载过程中的荷载对中是整个试验过程的关键。如果中所用时间太长或反复加卸荷的次数过多,都会使一部分徐变变形在测定初始变形值之前就发生,这对徐变变形的测值,尤其对早期徐变测值影响很大,还会导致徐变系数偏小。为了减少这部分变形损失,本标准在相当于棱柱体或圆柱体抗压强度 8% 的低应力情况下对中,可将加载过程中产生的徐变变形控制在仪表的误差范围内。荷载达到徐变应力后,虽然试件两个对侧的变形读数可能有差别,但其读数平均值基本不受两边受力不均的影响。
- 6) 测量徐变试件变形时,应同时测读收缩试件的变形,计算徐变参数时需要用到收缩变形值。
- 7) 在进行试验设计和徐变仪选用时,应尽量考虑使整个试验过程中荷载的损失小于规定的允许值。采用弹簧式徐变仪时,荷载的校核和补足可按以下步骤进行:先记下螺母的初始位置,用千斤顶加荷至 75% 徐变荷载,松开三个螺母,加荷到 100% 徐变荷载,此时,如果左右两表读数之和与校核前测得的读数相差不超过规定数值,可把三个螺母拧回原位,使上压板保持原有的位置;如校核结果荷载有较大的变化,则应在千斤顶保持 100% 徐变荷载的状态下,把三个螺母拧紧同样的角度,使上压板平衡向下压紧,松开千斤顶,检查千斤顶松开前后试件左右两表读数之和是否有显著差异,如差异过大,则应再次加压,调整螺母拧紧的程度。

随着现代混凝土强度等级的提高和徐变的减小,徐变试验过程中荷载的补足问题与以前相比没有那么麻烦,对于 C50 以上的混凝土,当徐变试验时间在一年左右时,一般不需要补足

荷载。

10.0.5 规定了徐变试验结果计算及处理方法。

徐变试验通常会获得三个测试指标，徐变应变、徐变度和徐变系数。计算时应注意三个指标的数量单位。徐变应变、收缩率和初始应变均精确至 1.0×10^{-6} 。

11 碳化试验

11.0.1 本条规定了碳化试验方法的适用范围和目的。

混凝土抗碳化能力是耐久性的一个重要指标，尤其在评定大气条件下混凝土对钢筋的保护作用（混凝土的护筋性能）时起着关键作用。本标准规定的试验方法、步骤及参数是目前我国有关单位最常用的。

11.0.2 本条规定了碳化试验对试件的要求。

1 过去用立方体试件进行碳化试验，每个试件只能使用一次，现在不少单位都采用棱柱体试件。棱柱体试件碳化试验到一定龄期，从一端劈开试件测定碳化深度，然后用石蜡封头后还可以继续进行碳化试验。这样，由于在同一个试件上测量得到各龄期的碳化深度值，消除了因试件不同而形成的误差。

2 实际操作时立方体试件使用更方便，也更容易得到，所以本标准规定也容许使用立方体试件，但因立方体试件只能使用一次，故其数量应按试验要求予以增加。

3 本标准规定，试件宜在 28d 龄期进行碳化，但是掺粉煤灰等掺合料的混凝土水化比较慢，特别是大掺量掺合料混凝土水化更慢，如在 28d 就进行强制碳化，则混凝土掺合料后期的水化效果在很大程度上被排除，影响了对粉煤灰等掺合料的正确评价，在这种情况下，碳化试验宜在较长的养护期后进行。

4 碳化试验后混凝土断面上碳化层的界限很不规则，甚至犬牙交错。为了防止测量过程中人为因素的影响，本标准规定在试验前即应画线，画线平行于试件长度方向，间距为 10mm，以定出测点位置，碳化到规定龄期破型后就按预定的测点测量碳化深度。

11.0.3 碳化试验设备的规定与原标准基本一致。目前市场上已

经有较成熟的碳化试验设备，而且我国已经有碳化试验设备的产品标准《混凝土碳化试验箱》JG/T 247。

11.0.4 本条规定了碳化试验的步骤。

1 试件在碳化箱内放置应有一定间距，保证各试件暴露面的碳化条件一致。

2 本次修订提高了二氧化碳浓度的精度控制。本标准采用在 $(20.0 \pm 0.5)\%$ 浓度的二氧化碳介质中进行快速碳化试验，其理由是：(1) 在 $(20.0 \pm 0.5)\%$ 浓度下混凝土的碳化速度，基本保持与自然碳化相同的规律，即 $x = \alpha\sqrt{t}$ 的关系。如浓度过高（如达到 50%）则早期碳化速度很快，7d 后速度明显减慢，碳化达到稳定。如浓度过低 [国外采用 $(1 \sim 4)\%$ 的浓度]，这种情况与实际比较接近，但是碳化速度太慢，试验效率低。(2) 在 $(20.0 \pm 0.5)\%$ 浓度下碳化 28d，大致相当于在自然环境中 50 年的碳化深度，与一般耐久性的要求相符。

碳化试验时，湿度对碳化速度有直接影响。湿度太高，混凝土中部分毛细孔被自由水充满，二氧化碳不易渗入，因此试验中采用比较低的湿度条件。但是，混凝土的碳化过程是一个析湿的过程：



尤其在碳化的前几天，析出的水分较多。因此要求试件在进入碳化箱前应在 60°C 下烘干 48h，以利于前几天箱内的湿度控制。

本标准规定的碳化试验的温度条件为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，比原标准规定的 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 要严格。由于温度对混凝土碳化速度有很大影响，温度高，碳化速度快。目前的碳化试验设备可以满足该温度要求。

3 由于温度、湿度和二氧化碳浓度对碳化结果影响很大，故本标准规定应经常监测碳化试验设备的温度、湿度和二氧化碳浓度的变化情况。目前的碳化设备可自动调节温度和二氧化碳浓度等条件，但对湿度条件还应进行人工干预。目前一般采用硅胶

作为干燥剂来控制湿度，也可以采用其他更好的方式来控制湿度。

4 规定了不同形状和尺寸试件的碳化深度检查方法。碳化试验一般在碳化进行到 3d、7d、14d、28d 龄期时测量试件的碳化深度。试件破型可根据条件采用劈裂法和干锯法。

5 碳化深度一般采用 1%酚酞酒精溶液作为指示剂来测定。酚酞指示剂与未碳化的混凝土碱性孔溶液反应变成红色，测量靠近边缘不变色部分的深度即为碳化深度。

11.0.5 本条规定了碳化试验结果计算和处理方法。

1 测量碳化深度时一般可选取 8 个~9 个测点进行测量，取各测点碳化深度的平均值作为该试件碳化深度测定值。

2 规定以 28d 碳化深度结果作为比较基准，以 3 个试件碳化深度平均值作为该组混凝土试件碳化深度的测定值，用于对比各种混凝土的抗碳化能力以及对钢筋的保护作用。

3 规定按不同龄期的碳化深度绘制碳化深度与时间的关系曲线，用于反映碳化的发展规律。

12 混凝土中钢筋锈蚀试验

12.0.1 本条规定了暴露于碳化环境的混凝土中钢筋锈蚀试验的适用范围和目的。

我国常用的钢筋锈蚀测量方法有两种，一种是直接测量被检钢筋的锈蚀面积及失重情况，另一种是测量钢筋在电化学过程中的极化程度，并根据所测量得到的极化曲线来判别钢筋有无锈蚀。鉴于后者只适用于溶液及水泥砂浆（未硬化或已硬化）中钢筋锈蚀的定性检验。混凝土中钢筋锈蚀的极化试验虽然做过一些尝试，尚需要进一步完善和改进，故本标准只采用破型直接检验钢筋质量损失的试验方法。

12.0.2 本条规定了试件的制作和处理要求。

1 规定了钢筋锈蚀试验的试件尺寸和数量。

2 规定了钢筋锈蚀试验用钢筋的规格、尺寸、数量及处理方式。本次修订将 QB235 盘条改为 HPB300 钢筋，且完善了钢筋清洗处理方法。由于锈蚀产物的质量与钢筋本身质量相比较小，故称量时应非常小心，称量仪器的精度应达到 0.001g。

3 制作试件时钢筋的定位非常重要，钢筋定位不准确将导致试验结果不准确，因此实际操作时应小心谨慎。同时保持钢筋干净不被污染也很重要，钢筋一旦被污染，将影响锈蚀速率，得到的试验结果就不准确。

4 试件成型后一般经过三个步骤的处理：首先是在成型室养护 24h 后拆模；其次是拆模后在端部刷毛，涂上不小于 20mm 厚的砂浆保护层；最后是经过潮湿养护 24h 后再移入标准养护室继续养护至 28d 龄期。要求端部砂浆的水灰比小于试件混凝土的水灰比，以保证其护筋和密封性能。

12.0.3 本条规定了混凝土中钢筋锈蚀试验有关设备和装置的

要求。

1 由于本试验方法主要针对碳化引起的钢筋锈蚀，因此试件应先经过碳化。碳化所用的设备与混凝土碳化试验所用的设备完全相同。

2 规定了钢筋定位板的材质、尺寸等要求。

3 称量设备最好采用电子秤，其操作较方便。

12.0.4 本条规定了混凝土中钢筋锈蚀试验的步骤。

1 碳化是引起钢筋锈蚀的主要因素之一，一般混凝土在未碳化前能很好地保护钢筋，只有碳化达到钢筋表面以后，钢筋才开始锈蚀。为了在钢筋锈蚀试验中考虑这一重要影响，本标准规定钢筋锈蚀试件应先经过 28d 碳化处理，也即相当于自然放置 50 年，再进行锈蚀试验。

2 标准养护条件下钢筋锈蚀的发展较慢，因此本标准规定标养 56d 后破型查锈。混凝土在饱水情况下氧气不易渗入，钢筋锈蚀的速度反而会降低，因此规定试件在标准养护室内应避免直接淋水，放置试件的格架应带有顶棚以防止养护水喷在试件上。

3 由于测量钢筋锈蚀程度采用酸洗的方法，而酸对未锈蚀的钢筋也会有一定破坏，为了避免酸洗本身带来的影响，用相同材质的未锈蚀钢筋作为基准校正。

12.0.5 本条规定了试验结果的计算和处理方法。

钢筋锈蚀的试验结果有多种表示方法，本标准仅采用钢筋失重率作为表达指标。钢筋锈蚀面积表达法在锈蚀不大时很难分清锈蚀和未锈蚀的界限，而锈蚀严重时又不能反映它们程度上的差别，因此本标准未将锈蚀面积作为钢筋锈蚀的指标。

13 抗压疲劳变形试验

13.0.1 本条规定了抗压疲劳变形试验的适用范围和目的。

在重复荷载作用下混凝土的纵向变形的变化规律可分为三个阶段，如图1所示。图中横坐标为重复荷载循环次数 N ，纵坐标为纵向应变 ϵ 。在第一阶段开始时，混凝土的纵向总应变发展较快，随后其增长速率逐渐降低，当纵向应变达到 $\epsilon'_{\max}$ 时，第一阶段结束，这一阶段占总疲劳寿命的10%左右。在第二阶段，混凝土的纵向总应变增长速率基本为一定值，混凝土的纵向总应变及纵向残余应变随荷载重复次数的增加基本呈线性规律变化，这

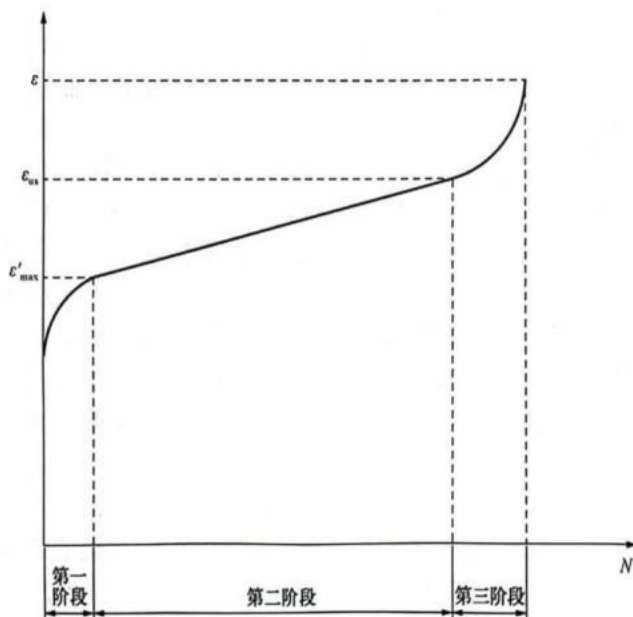


图1 纵向应变随荷载重复次数的变化规律

一阶段占总疲劳寿命的 75% 左右。进入第三阶段后,混凝土的纵向总应变及残余应变发展很快,混凝土进入失稳破坏。第三阶段开始时的混凝土纵向应变称为混凝土失稳临界应变,以符号 ϵ_{us} 表示,这一阶段占混凝土总疲劳寿命的 15% 左右。

混凝土在重复荷载作用下,内部微裂缝和损伤的发展也可分为三个相应的阶段。第一阶段为混凝土内部微裂缝形成阶段。由于混凝土内部的薄弱环节存在,在第一阶段,随着荷载重复次数的增加,水泥和粗骨料结合处及水泥砂浆内部薄弱区迅速产生大量微裂缝,这表现在开始几周荷载重复时,混凝土的纵向残余变形和总变形发展较迅速,但随着重复次数的进一步增加,每周荷载循环形成的新裂缝数目逐渐减少,混凝土内部薄弱区域形成微裂缝的过程已趋于完成。这些已形成的微裂缝由于遇到其他骨料和水泥石的约束,不能迅速发展,在宏观上表现为混凝土应变增长速率逐渐降低。当混凝土内部应力高度集中的薄弱区域和微裂缝形成基本完成后,混凝土的疲劳损伤进入占疲劳寿命绝大部分的损伤发展第二阶段,即损伤随荷载重复次数的增加而线性增加。在第二阶段,已形成的裂缝处于稳定扩展阶段,此时的线性累积损伤主要是水泥砂浆中新的微裂缝累积。随着损伤累积的增长,水泥砂浆的断裂韧度不断降低,当损伤达到一定程度后,这些微裂缝达到临界状态,从而导致裂缝的不稳定扩展,使疲劳损伤进入迅速增加的第三阶段。在第三阶段,混凝土的超声波传播速度急剧降低,波幅急剧衰减,试件表面可以见到明显裂缝。

根据以上分析可知,混凝土的疲劳破坏是由于骨料和砂浆间的粘结裂缝和砂浆内部的微裂缝贯穿而形成连续、不稳定的裂缝引起的,这与混凝土的静载破坏机理是一致的。Wittmann 和 Zaitsea 认为,对于给定材料,当该材料内部的裂缝长度达到临界长度后,这一裂缝将发生不稳定扩展,而和所施加的荷载种类和荷载历程无关。根据这一观点,可以认为,对混凝土材料而言,当混凝土内部裂缝发生不稳定扩展时,该裂缝的临界长度是一定的。这一临界长度取决于混凝土材料的性质。因此,当内部

裂缝不稳定扩展时,由这些微裂缝导致的混凝土纵向应变是相同的,是混凝土的材料常数,和加载历史无关,即混凝土疲劳破坏时混凝土的纵向应变是相同的。混凝土疲劳破坏试验结果充分证明了这一结论的正确性。

对一次加载而言,超过裂缝临界长度和纵向总应变后,混凝土的纵向总应变迅速增加。对疲劳破坏而言,当超过这一数值后,随荷载作用次数的增加,混凝土纵向应变急剧增加,试件表面可见明显的沿加载方向的纵向裂缝,试件很快发生破坏,可以取裂缝失稳扩展时的临界裂缝长度或此时混凝土的纵向总应变,作为判断混凝土破坏的疲劳破坏准则。由于裂缝失稳扩展时的临界裂缝长度较难确定,故取失稳扩展时混凝土的纵向总应变作为混凝土的疲劳破坏准则。这一结论和 Jan. Ove. Holmen 给出的“可以利用混凝土极限应变作为混凝土的疲劳破坏准则”是一致的。

基于上述论述,铁道科学研究院提出了以混凝土轴心受压重复应力下的混凝土纵向疲劳变形增量达到 $0.4f_c/E_c$ 作为混凝土疲劳失效的判据,其中 f_c 为混凝土的静载轴心抗压强度, E_c 为混凝土的原点切线弹性模量。

虽然可采用测量极限应变从而得到混凝土的极限疲劳性能,但由于疲劳变形增量限值的取值目前尚未有统一的认识,因此在本标准中不作规定,仅提供一种测量混凝土疲劳变形的办法,为今后进一步完善该方法提供数据。

13.0.2 本条规定了抗压疲劳变形试验的有关设备要求。

1、2 疲劳试验机的规定与原标准相同。

3 变形测量装置要求在疲劳试验过程中具有较好的精度。

13.0.3 本条规定了疲劳试验应采用 6 个试件为一组,其中 3 个做变形试验,另外 3 个做轴心抗压强度试验。

13.0.4 本条规定了抗压疲劳变形试验的步骤。

1 由于疲劳试验持续时间较长,为了减少第一个试件与最后一个试件因试验开始时间不同引起的试验误差,本标准规定试

件应在室温 (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 下存放 3 个月龄期再进行试验 (不要求在标准养护室继续存放)。

2 用 3 个试件确定轴心抗压强度, 作为抗压疲劳变形试验确定荷载的基准。

3 疲劳变形试验的试件对中很重要, 实际操作时需仔细。疲劳试验与静力试验不同, 试件内部应力调整能力比较低, 因此在进行疲劳变形试验时, 要求对试件进行物理对中 (受力情况下进行对中)。采用两次对中, 以保证对中效果。

4 规定了抗压疲劳变形试验的脉冲频率、上下限应力。

在等幅应力循环次数为 2×10^6 时, 对于疲劳试验的上下限应力, 不同国家和标准有不同的规定, 如表 2 所示。

表 2 应力下限不同时不同文献对混凝土应力上限水平的规定

设计规范或文献	混凝土应力下限水平 ($\sigma_{\min}/f_c$)					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
铁道科学院混凝土结构疲劳专题组建议	0.62	0.66	0.70	0.73	0.77	0.81
美国 ACI215 委员会建议	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.70
苏联 СНиП2、05、03 规定	0.63	0.65	0.68	0.72	0.74	0.76
文献 1 (日本)	0.57	0.64	0.69	0.74	0.79	0.83
文献 2 (日本)	0.63	0.67	0.70	0.74	0.76	0.81
我国原 TJ 10-74 规定	0.55	0.56	0.62	0.68	0.74	0.79

从表 2 可以看出, 各设计规范和文献中提出的混凝土应力上下限水平差别并不大, 本标准采用了铁道科学院混凝土结构疲劳专题组的建议值, 即疲劳的上限应力取 $0.66f_c$, 下限应力取 $0.1f_c$ (其中 f_c 表示混凝土的轴心抗压强度)。在有特殊要求时, 上限应力和下限应力可根据要求按表选定。

5 为了简化试验, 本标准取一种疲劳循环次数 (200 万次) 作为试验的基础。这与钢筋混凝土设计规范疲劳折减系数的取值原则基本一致, 也和目前钢材疲劳试验所采用的循环次数相同。

虽然 200 万次疲劳试验对混凝土来说可能变形没有达到稳

定，随着疲劳次数的增加其变形还会增加，但增加的幅度减小了。有些设计规范中还要求疲劳次数有更高的性能指标（如 700 万次），一个 700 万次的疲劳试验需要试验机不断地运行 20d 左右，试验周期太长，不宜作为试验的基础。而 200 万次的疲劳试验大概需要试验机连续运行 6d 左右。

13.0.5 本条规定了抗压疲劳变形试验结果的计算和处理方法。

14 抗硫酸盐侵蚀试验

14.0.1 本条规定了抗硫酸盐侵蚀试验方法的适用范围、目的和评价指标。

混凝土在硫酸盐环境中，同时耦合干湿循环条件的实际环境经常遇到，硫酸盐侵蚀再耦合干湿循环条件对混凝土的损伤速度较快，故规定本试验方法适用于处于干湿循环环境中遭受硫酸盐侵蚀的混凝土抗硫酸盐侵蚀试验，尤其适用于强度等级较高的混凝土抗硫酸盐侵蚀试验。评价指标为抗硫酸盐等级（最大干湿循环次数），符号采用汉语拼音的首字母 KS 来表示。

14.0.2 本条规定了抗硫酸盐侵蚀试验所用的试件要求。

1 尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体混凝土试件可用于测量抗压强度指标，尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体试件可用于测量抗折强度指标。在抗硫酸盐侵蚀试验中，抗折强度指标比抗压强度指标敏感，但抗压强度指标对结构受力计算和设计更有意义，且抗折强度试验结果离散性大，试验误差大，对设备要求较高，操作不便，故本标准规定采用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体混凝土试件来进行抗硫酸盐侵蚀试验。

2 规定了混凝土取样、试件的制作和养护要求。

3 试件的数量应根据设计的抗硫酸盐等级来选择。

14.0.3 本条规定了抗硫酸盐侵蚀试验设备的有关要求。

1 国内用于抗硫酸盐侵蚀试验的干湿循环试验设备已经开发成功，试验验证表明其性能稳定，能够节省人力，减轻劳动强度，试验结果可靠，故本标准规定优先采用能够自动进行干湿循环的设备。

2 考虑到有些单位进行抗硫酸盐侵蚀试验的试验量可能不

大,故本标准规定也可以采用一般的烘箱进行非自动干湿循环试验。27L 溶液一般可供 3 组试件试验。

3 规定了抗硫酸盐侵蚀试验需要的试剂的要求。

14.0.4 本条规定了抗硫酸盐侵蚀试验的步骤和程序。

1 抗硫酸盐侵蚀试验的龄期规定为 28d,设计另有要求时按设计规定龄期进行试验。混凝土掺入粉煤灰等掺合料后,抗硫酸盐侵蚀能力一般都会有所提高,而掺合料发挥作用通常需要较长龄期,因此对于掺入较大量掺合料的混凝土,其抗硫酸盐侵蚀试验的龄期可在 56d 进行。

因试件为标准养护,试件内含水率通常较高,需要先干燥才能进行抗硫酸盐侵蚀试验。干燥时间规定为 48h,干燥温度以能够去除大部分毛细水分为原则。温度太高,则损伤试件或去除了部分结合水;温度太低则速度慢,不能去除大部分毛细水分,且试验效率低。本标准规定干燥温度为 $(80 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。

2 试件在干湿循环试验设备中应有一定间距,保证试件各表面有充足的溶液浸泡。

3、4 试件浸泡、注入溶液、排出溶液的总时间为 16h。本标准规定试验过程中应定期(一般为 15 个循环)测试溶液的 pH 值,始终维持溶液的 pH 值在 6~8。这是因为刚开始试验时,试件中渗出物质较多,可能引起溶液 pH 值变化,影响试验结果。在后期,试件中的物质与溶液中物质处于平衡状态,溶液 pH 值变化较小。故试验初期应经常检查溶液的 pH 值,而后期检查的间隔时间可以较长。溶液的 pH 值可采用 1mol/L 的 H_2SO_4 溶液进行调节。

由于定期检测溶液的 pH 值操作比较麻烦,做对照试验时也可不检测溶液的 pH 值,而是采取定期(通常为一个月)更换溶液的方法,维持溶液中的硫酸盐浓度基本不变。国内研究表明,这样做对试验结果影响不大。

5、6 规定了试件烘干温度为 $(80 \pm 5)^{\circ}\text{C}$,烘干时间为 6h,冷却时间为 2h,烘干和冷却总时间共 8h。

7 一个干湿循环的总时间为 (24 ± 2) h, 这样便于计算时间和安排试验。

8 规定应按设计需要或表 14.0.2 要求进行中间检查和测试。

9 规定了抗硫酸盐侵蚀试验结束的三个条件: 抗压强度耐蚀系数达到 75%、干湿循环试验达到 150 次或达到设计规定的次数。三个指标只要有一个达到即可结束试验。

大量试验结果表明, 当抗压强度耐蚀系数低于 75%, 混凝土遭受硫酸盐侵蚀损伤就比较严重。当干湿循环次数达到 150 次时, 如果各种指标均表明混凝土硫酸盐抗侵蚀能力较好, 则可以停止试验。验证试验表明, 混凝土在硫酸盐溶液中进行干湿循环试验时, 多数情况下试件的质量是增加的, 或即使质量减少, 也很难达到 5% 的质量损失率要求, 因此本标准未采纳其他标准和资料中推荐的质量损失率和质量耐蚀系数指标。

14.0.5 本条规定了抗硫酸盐侵蚀试验结果的计算和处理方法。

15 碱-骨料反应试验

15.0.1 本条规定了碱-骨料反应试验方法和适用范围。

本方法主要参考加拿大 CAN/CSA-A23.2-14A:2004《Test Method for Potential Expansive of Cement-aggregate Combination (Concrete Prism Expansion Method)》编写而成,也参考了欧洲材料与结构试验联合会(RILEM)下属的碱-骨料反应与预防委员会(TC 191 ARP)提出的混凝土棱柱体试验法(AAR-3),适用于检测骨料的碱活性。试验中把混凝土棱柱体放在温暖潮湿的环境中养护12个月,以激发骨料潜在的碱-骨料反应活性。我国《水工混凝土试验规程》SL/T 352-2006中的碱-骨料反应(混凝土棱柱体法)也是参考加拿大标准制定的(版本不同)。

鉴于碱-骨料反应病害对混凝土耐久性的严重影响,以及《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52-2006中为预防碱-骨料反应病害已列入“砂浆长度法”、“快速砂浆棒法”和“岩石柱法”等检测骨料碱活性的方法,本标准中有必要列入“混凝土棱柱体法”,以进一步完善我国检测混凝土骨料碱活性的试验方法系列,有利于更好地预防混凝土碱-骨料反应病害。

碱-骨料反应已给世界许多国家造成了重大损失,对付碱-骨料反应重在预防,若等工程结构出现病害再去治理,往往难以处理,且花费巨大。

本标准中有关碱-骨料反应的混凝土试验方法,主要为推动以下三方面的工作:

(1) 提高碱-骨料反应试验水平。如前所述,过去的工作偏重于砂浆棒法试验(起初主要是40℃的传统砂浆棒法,之后是80℃的快速砂浆棒法),与工程实际情况中间差一环:混凝土棱柱体试验。目前我国用此方法测得的试验数据较少,仅在某些大

工程,如三峡大坝检测骨料活性时用此方法与其他方法对比。而目前国际上的测长试验,首先看有没有混凝土试验数据,若没有才考虑砂浆棒试验法的结果,因为前者与工程实际最为接近。我国幅员辽阔,骨料情况复杂,理应尽快建立各地骨料的混凝土棱柱体膨胀数据,避免单纯使用砂浆棒法可能带来的不良后果。

(2) 为建立预防碱-骨料反应综合体系打好试验基础。从判断骨料碱活性的试验方法,到判断工程是否发生有害碱-骨料反应,都应使用混凝土棱柱体试验法。我国目前一些评价掺合料抑制碱-骨料反应的试验标准,多以快速砂浆棒法、小混凝土柱法为主,与国际上公认的棱柱体法缺乏可比性。况且抑制碱-骨料反应的方法还有限制碱含量、使用特种外加剂等,若仅用快速砂浆棒法,不易科学评价其效果。无论检测骨料活性,还是判断某一工程是否存在碱-骨料反应风险,除参照既有标准进行试验外,均应进行混凝土棱柱体试验。

(3) 完善我国混凝土长期性能和耐久性能的试验方法体系。作为长期性能和耐久性能试验,国外的混凝土棱柱体试验一般为1年~2年,有的长达10年以上,这些数据为工程决策提供了宝贵参考依据。我国一些重大工程,如跨海公路桥梁、高速铁路桥梁、大坝等,已提出使用寿命100年的要求,仅使用2周~4周的砂浆棒试验评价碱-骨料反应风险显然是不够的,必须针对实际工程的混凝土配合比,及早进行长期的混凝土试验,为评价长期的碱-骨料反应风险提供可靠依据。

混凝土碱-骨料反应试验方法主要通过检测在规定的、湿度和温度条件下,混凝土棱柱体由于碱-骨料反应引起的长度变化,该方法可用来评价粗骨料、细骨料或粗细混合骨料的潜在活性,也可用来评价辅助胶凝材料(即掺合料)或含锂掺合料对碱-硅反应的抑制效果(但需要进行为期2年的试验)。由于本试验方法采用的是混凝土试件,故将其归入混凝土耐久性试验方法。

使用本方法时,应注意区分碱-骨料反应引起的膨胀和其他原因引起的膨胀,这些原因可能有(但不限于)以下几种:

(1) 骨料中存在诸如黄铁矿、磁黄铁矿和白铁矿等，这些矿物可能会氧化并水化后伴随膨胀，或同时产生硫酸盐，对水泥浆体或混凝土造成破坏。

(2) 骨料中存在诸如石膏的硫酸盐，对水泥浆体或混凝土造成破坏。

(3) 水泥或骨料中存在游离氧化钙或者氧化镁，其可能不断水化或碳化伴随膨胀，导致水泥浆体或混凝土的破坏。钢渣中存在游离氧化钙和氧化镁，其他骨料中也可能存在。

使用本方法判断骨料潜在碱活性时，应进行其他补充试验，以确定该膨胀确实由碱-骨料活性所致。补充试验可在试验完毕后通过对混凝土试件进行岩相分析检测，以确定是否有已知的活性组分存在。

15.0.2 本条规定了混凝土碱-骨料反应试验的仪器设备要求。

1 规定了筛孔的公称直径。

2 分别规定了磅秤、台秤的要求。

4 测钉应采用不锈钢制作，以便能重复使用，测头（埋钉）是重要部件，应与试模高度匹配。

5 规定了测长仪的量程和精度。

6 规定了养护盒的要求。市场上已经有将养护盒和养护箱做成一体的碱-骨料反应试验设备，这类设备能够满足本标准提出的有关试验要求。

15.0.3 本条规定了碱-骨料反应试验的步骤。

1 规定了制备试件所用原材料的要求。

1) 规定了所用水泥应是高碱水泥，我国北方地区许多水泥碱含量超过 0.6%，但不一定到 0.9%，可选取一些碱含量较高的水泥，并需用 NaOH 调整碱含量至 1.25%，主要目的是激发和加速可能的碱-骨料反应，并非针对现场情况。由于碱含量为 0.9% 的水泥不一定在每个地方都能够找到，故规定为“宜”采用碱含量为 0.9% 的水泥，允许有一定选择。

将水泥碱含量从 0.9% 调整到 1.25% 的计算实例如下:

单方混凝土水泥用量为 $420\text{kg}/\text{m}^3$, 则混凝土中的碱含量为 $420 \times 0.9\% = 3.78\text{kg}$; 混凝土中需要达到的碱含量为: $420 \times 1.25\% = 5.25\text{kg}$; 二者的差 1.47kg 即为应该加到拌合水中的碱含量 (以当量计)。

将 Na_2O 转化为 NaOH 的因子计算: $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$, 分子量: $\text{Na}_2\text{O} = 61.98$, $\text{NaOH} = 39.997$; 则转换因子为 $2 \times 39.997 / 61.98 = 1.291$, 需要增加的 NaOH 为 $1.47 \times 1.291 = 1.898\text{kg}/\text{m}^3$ 。

- 2) 如果 20mm 筛上的骨料质量分数 (筛余) 大于 15%, 则应将筛余部分破碎使其能够通过 20mm 筛。如果被试验的粗骨料最大公称粒径为 16mm, 则最后被试验的骨料由 (16~10)mm、(10~5)mm 组成。
- 3) 规定水灰比为 0.42~0.45, 允许在此范围内调整, 目的是使混凝土获得足够的工作性, 以保证混凝土在模具内能够成型密实。水泥用量固定为 $(420 \pm 10)\text{kg}/\text{m}^3$, 以保证混凝土强度等指标基本一致。混凝土除了使用 NaOH 调整碱含量外, 不得再使用其他外加剂, 以控制碱含量在规定的范围内, 并避免其他因素对试验结果的干扰。

2 规定了试件的制作步骤和程序。

与一般混凝土成型方法基本相同。因混凝土拌合物没有加其他外加剂, 不同骨料组成的拌合物工作性可能有些差距, 此时可通过适当调整水灰比 (在本标准规定的范围内) 来达到工作性要求。成型时应确保混凝土密实、表面平整。试件成型后的养护温度和湿度与参考的标准略有区别, 加拿大标准规定的温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 即 $(21 \sim 25)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 100%。为适应我国试验条件, 将养护温度改成 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 即 $(18 \sim 22)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 95% 以上。两种养护条件基本相同。

3 规定了试件的养护及测量步骤。

- 1) 因试件中埋有测头, 拆模时需要特别小心, 避免损坏测头与试件之间的粘结。初始长度测量要及时, 防止试件干燥。
- 2) 规定了测量长度的操作应在恒温室进行。
- 3) 初始长度测量完成后, 试件的养护条件就改变了。由标准养护变成在 $(38 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的条件下养护, 而且是放在养护盒中。
- 4) 由于养护盒的温度与恒温室的温度不同, 每次将试件从养护盒中取出来测量长度时, 应先在恒温室进行温度调制, 即在恒温室放置 24h。每次测量完毕, 应将试件掉头放入养护盒中, 以便试件两端处于基本相同条件。注意测量长度的龄期是以测量完基准长度开始计算。
- 5) 长度测试周期全部结束后, 可辅以岩相分析, 以观察凝胶孔中物质、骨料粒子周边的反应环、水泥浆和骨料微裂缝等, 作为发生碱-骨料反应的判断指标。岩相分析也可用于辨别岩石品种。

4 规定碱-骨料反应试验的结束条件。结束条件有两个: 一是 52 周的膨胀率达到 0.04%, 二是试验时间达到 52 周, 二者之一得到满足即可停止试验。

15.0.4 本条规定了试验结果的计算和处理方法。

1、2 计算试件膨胀率时, 应注意标距是不含测头长度的。

3 试验精度分两种情况: 膨胀率较小时, 规定膨胀率极差(单个试件膨胀率最大值与最小值之差)小于 0.008%。膨胀率较大时, 规定膨胀率相对偏差不超过 40%。

美国和加拿大标准中, 用一年膨胀率达到 0.04% 作为判断骨料是否具有潜在危害性反应活性。当混凝土试件在 52 周或一年的膨胀率超过 0.04% 时, 则判定为具有潜在碱活性的骨料; 当混凝土试件在 52 周或一年的膨胀率小于 0.04% 时, 则判定为

非活性的骨料。

试验时间达到 52 周以后，也可根据研究需要或其他试验目的，继续进行试验到设定龄期，如 2 年等。如要判断掺合料等对碱-骨料反应的抑制效果，通常需要进行 2 年以上的试验。

16 抗气体渗透试验

16.0.1 本条规定了抗气体渗透试验方法的适用范围和目的。

抗气体渗透试验主要反映混凝土试件的抗气体渗透性能，表征混凝土的密实程度与内部缺陷情况。本标准抗气体渗透试验方法参考国外标准 RILEM TC 116-PCD 修改而成，其主要原理是在密封容器中测试一定气体压力下透过混凝土试件的气体流量，并计算得到混凝土渗透率，来表征混凝土的抗气体渗透性能。

16.0.2 本条规定了抗气体渗透试验设备的有关要求。

16.0.3 本条规定了抗气体渗透试验试件制作的有关要求。

3 试件侧面采用环氧树脂密封，以防止试件侧面的孔洞或缺陷影响橡胶囊对试件侧面的密封。

4 研究表明，混凝土试件的内部湿度或含水量会显著影响其抗气体渗透性能。故本标准对试件的预干燥处理进行了规定。

16.0.4 本条规定了抗气体渗透试验步骤。试验装置的气密性可采用水浴法等方式进行检验。

16.0.5 本条规定了抗气体渗透试验结果计算和处理方法。