

温度对混凝土强度的影响

张子明 周红军 赵吉坤

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 基于混凝土材料的宏观和微观结构的组成,研究了混凝土的宏观强度特性,揭示了混凝土的强度主要取决于其孔隙率.水灰比决定了混凝土的孔隙率和强度.环境温度升高加快水泥水化反应速率和水分蒸发速率,对混凝土的早、后期强度产生影响.介绍了温度效应的几种理论:(a)孔隙系统分布理论;(b) SiO_2 最优量理论;(c)内部开裂理论;(d)凝胶体的非均质性理论.研究表明,环境温度升高加快了混凝土早期强度的发展,而降低了其后期强度.

关键词 混凝土强度;孔隙率;水灰比;水化反应速率;微观力学;相对强度

中图分类号 :TU528 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2004)06-0674-06

混凝土是由水泥、骨料和水共同组成的复杂多相聚集体.从宏观结构上看,可以把混凝土看成是连续相的水泥浆和离散相的嵌入在水泥浆中的骨料颗粒所组成的复合材料^[1],并且当结构尺寸大于骨料尺寸 4 倍时,混凝土往往可以看成是均匀的各向同性材料;从微观结构看,混凝土是由水泥凝胶、氢氧化钙结晶、未水化的水泥颗粒、凝胶孔隙、毛细管、孔隙水以及气泡等组成,因为混凝土水化反应要延续相当长的时间,毛细管中的水分还会继续蒸发,留下不少孔隙与裂缝,因而从微观上看混凝土是不均匀的多相材料^[2].本文从宏观和微观两个方面研究影响混凝土强度的主要因素以及温度对混凝土强度发展的影响.

混凝土的强度取决于:(a)硬化的水泥浆的强度;(b)浆体-骨料黏结强度;(c)骨料的特性.在这 3 个因素中,水泥浆的强度是最重要的,所有影响水泥浆强度的因素都会影响混凝土的强度.

1 混凝土宏观组成材料的强度特性

1.1 硬化水泥浆的强度特性

硬化水泥浆是由多孔(孔隙率约为 28%)且具有较大比表面积的硅酸盐凝胶颗粒组成的坚固凝胶体,水泥浆的强度取决于其多孔结构特性.因此,孔隙率成为水泥浆强度的决定性因素.水泥浆和孔隙率的关系可表示为

$$S = S_0 \exp(-bp) \quad (1)$$

式中: S ——水泥浆的强度; p ——孔隙率; S_0 ——零孔隙率时水泥浆的强度(即 $p = 0$); b ——与水泥种类和水泥浆龄期有关的常量.

从式(1)可以看出,孔隙率增大后,水泥浆强度呈指数级数衰减.水泥的最初孔隙率(水-水泥混合物中未水化的水泥颗粒相互间最初的距离)与水灰比的关系可表示为

$$p_i = \omega / (\rho + \omega) \quad (2)$$

式中: p_i ——最初孔隙率; ρ ——水泥的密度; ω ——水灰比.

从式(2)可以看出,最初孔隙率随着水灰比的增大而增大.水泥水化时,水化产物包裹在水泥颗粒表面,其体积约为未水化水泥颗粒核的 2.2 倍.因此,孔隙率由水泥颗粒间的水化程度决定,其距离和孔隙率都将随着水化进程的发展而减小.水泥浆的孔隙率可表示为

$$p_t = 1 - \frac{0.32 + 0.187\alpha}{0.32 + \omega} \quad (3)$$

式中： p_t ——水泥浆的孔隙率； α ——水化程度。

式(3)可用图1表示。从图1可以看出，孔隙率随着水化反应的增大和水灰比的减小而减小。

以上分析表明，在相同的水化程度下（即相同的龄期和养护方案），水泥浆的孔隙率仅仅由水灰比决定。进一步可以推断，在这种情况下，混凝土的强度只取决于水灰比。图2中的曲线表明，水泥浆的抗压强度随着水灰比的增大而减小。

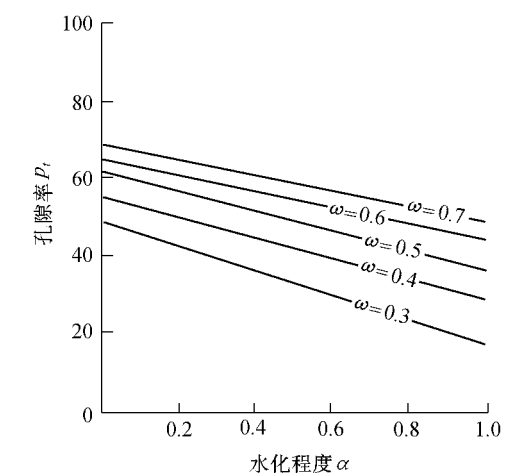


图1 水灰比和水化程度对水泥浆孔隙率的影响

Fig.1 Effect of ω and degree of hydration on total porosity of cement paste

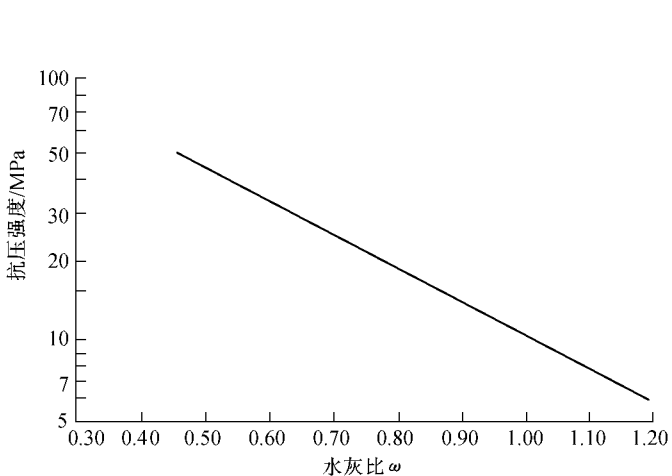


图2 水灰比与水泥浆抗压强度的关系

Fig.2 Relation between compressive strength of cement pastes and ω

1.2 浆体-骨料的黏结强度特性

水泥浆与嵌入其中的骨料颗粒的黏结强度主要取决于两者之间的物理作用。因为骨料一般呈惰性，与水泥浆很少发生化学反应，所以浆体-骨料黏结强度主要与水灰比和骨料的表面特征有关。水灰比对浆体-骨料黏结强度的影响类似于对水泥浆强度的影响，即水灰比减小水泥浆强度和浆体-骨料黏结强度随之增大^[3,4]。可以看出，水灰比对于混凝土强度起决定性作用。粗糙的骨料表面可以提高水泥浆和骨料之间的咬合力，因而可以提高浆体-骨料的黏结强度，从而提高混凝土的强度。试验结果表明，在其他条件相同的情况下，使用粗糙骨料的混凝土的强度较高。通常，在水灰比较低的情况下尤其明显。

不同养护温度下浆体-骨料黏结强度的试验结果(图3)表明^[3]，在5℃、21℃和42℃不同的养护温度下，浆体-骨料黏结强度变化不大。这些结果与通常的推断相反，因为温度影响水化反应速率，从而影响水泥浆的孔隙率，而后者决定混凝土的强度。因此，温度升高应该提高浆体-骨料早期黏结强度。试验结果与预测相反说明，还有其他不利因素抵消了温度对早期强度的提高效应。这些不利因素可能是由于两种材料不同的热膨胀导致在浆体-骨料的交界面上产生裂缝而降低了两者的黏结强度^[5]。水泥浆的热膨胀系数根据其不同的湿度，在 $11 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的范围内变化，而普通骨料的热膨胀系数略低，变化范围为 $5 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

1.3 骨料特性对混凝土强度的影响

骨料特性也会影响混凝土的强度。通常，混凝土的强度随着骨料的弹性模量和强度的增大而增大。最为重要的是骨料表面特征对浆体-骨料黏结强度的影响。

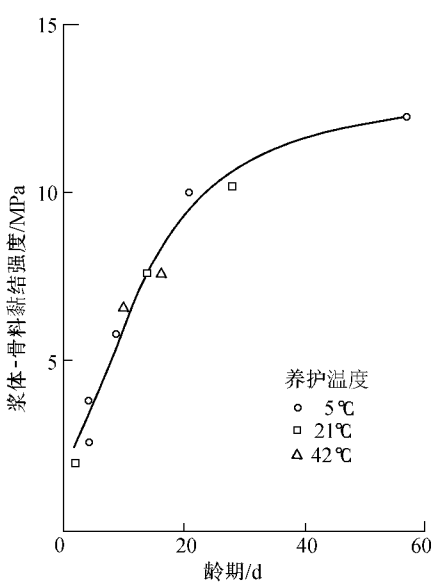


图3 养护温度和浆体-骨料黏结强度的关系

Fig.3 Relation of paste-aggregate bond strength and curing temperature of concrete

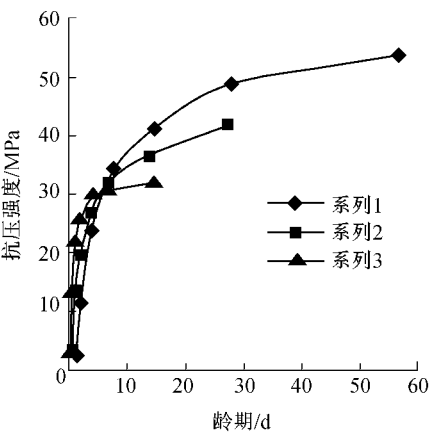


图 4 混凝土的抗压强度-时间数据和最佳拟合曲线

2 温度效应

温度对混凝土强度的影响表现在 3 个方面 (a)水化反应的速率 (b)混凝土内部结构的特性 (c)蒸发和干燥速率. 温度对混凝土有两个相反的效应:一方面,温度升高加快了水化反应速率,因此促进了混凝土早期强度的发展;另一方面,温度升高导致水分蒸发速度加快,水化中可以利用的水分减少.因此,高温炎热气候又延缓了水化反应的进程,甚至引起水化反应的完全停止.一般认为,高温对混凝土的后期强度有不利影响,温度对混凝土强度的效应依赖于具体条件.混凝土抗压强度在不同养护温度下随时间增长的试验结果如图 4 所示.从这些曲线可以看出,养护温度越高,早期强度增长越快,而后期强度越低,反之亦然.目前有以下几种理论可以解释混凝土的温度效应.

Fig.4 Optimal fitting curves for compressive strength-age data of concrete

2.1 孔隙系统分布理论

混凝土的强度取决于水泥浆的孔隙率,主要与混凝土中较大的孔隙有关,而与水泥浆的整体孔隙率关系不大.处于高温养护状态下的混凝土,水化反应较快,整体孔隙率虽然较小,但其较大孔径的孔隙数目却较多.也就是说,高温是与较粗糙的孔隙系统相联系的.试验结果如图 5 所示^[6],从图 5 可以看出,在 60℃ 的养护温度下,尽管水泥浆的整体孔隙率较低,但其孔径大于 750 Å 孔隙的数目高于在 27℃ 时相应孔径孔隙的数目.

水泥的最终水化程度取决于包裹未水化水泥颗粒核的水化产物层的临界厚度,而包裹层厚度由凝胶层的密度决定,凝胶层的密度受温度的影响不大.因此,最终水化程度并不受温度高低的影响.也就是说,高温对早期水化反应的作用并不影响混凝土的后期强度,高温所带来的粗糙孔隙系统降低了混凝土的后期强度和抗渗性能.

2.2 SO₃ 的最优量理论

在不同的试验中发现,温度升高对混凝土后期强度不利影响的数据有很大不同,试验结果如图 6 所示.一方面,在 5~46℃ 的养护温度范围内,混凝土的后期强度逐渐降低;另一方面,在同样的养护温度范围内,混凝土最高强度的最优温度在变化.在图 6(b)中的最优温度为 13℃,图 6(d)中则为 20~30℃,图 6(c)显示了最不利的温度(混凝土最低强度的温度),说明还有其他因素影响混凝土后期强度.

SO₃ 的最优化理论可以解释上述现象.该理论认为,温度升高影响了水泥中最优的石膏含量的掺入.水泥中掺入石膏是为了使水泥中有最优的 SO₃ 含量.因为水泥中含有 10% 左右 C₃A (铝酸三钙),C₃A 与水即刻反应,瞬间凝结,生成物的强度极低,只有几兆帕.掺入适量的 SO₃ 可以延缓 C₃A 的快速水化,有利于混凝土强度的发展.但是水泥中掺入过多的 SO₃ 会使混凝土中生成大量钙矾石,钙矾石会引起混凝土的体积膨胀进而发生开裂.在较高的环境温度下,SO₃ 的最优掺入量也应随之增加,才能使混凝土有最大的强度.任何掺入量的偏差都会导致混凝土强度的降低,尤其是在温度较高的情况下,SO₃ 的最优掺入量容易发生偏差,因此这种理论可以解释混凝土后期强度降低的原因.

2.3 内部开裂理论

新浇混凝土暴露在剧烈干燥的气候条件下会发生塑性收缩,当收缩受到限制时,混凝土内部产生拉应力.当应力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土内部产生裂缝,强度随之降低.然而,新浇混凝土早期短时间的

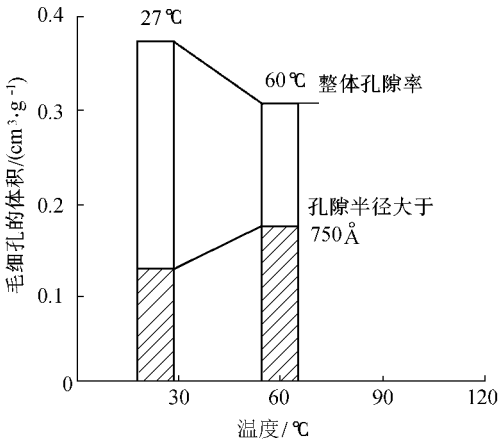


图 5 温度对整体孔隙率和半径大于 750 Å 孔隙的影响

Fig.5 Effect of temperature on total porosity and pores with a radius greater than 750 Å

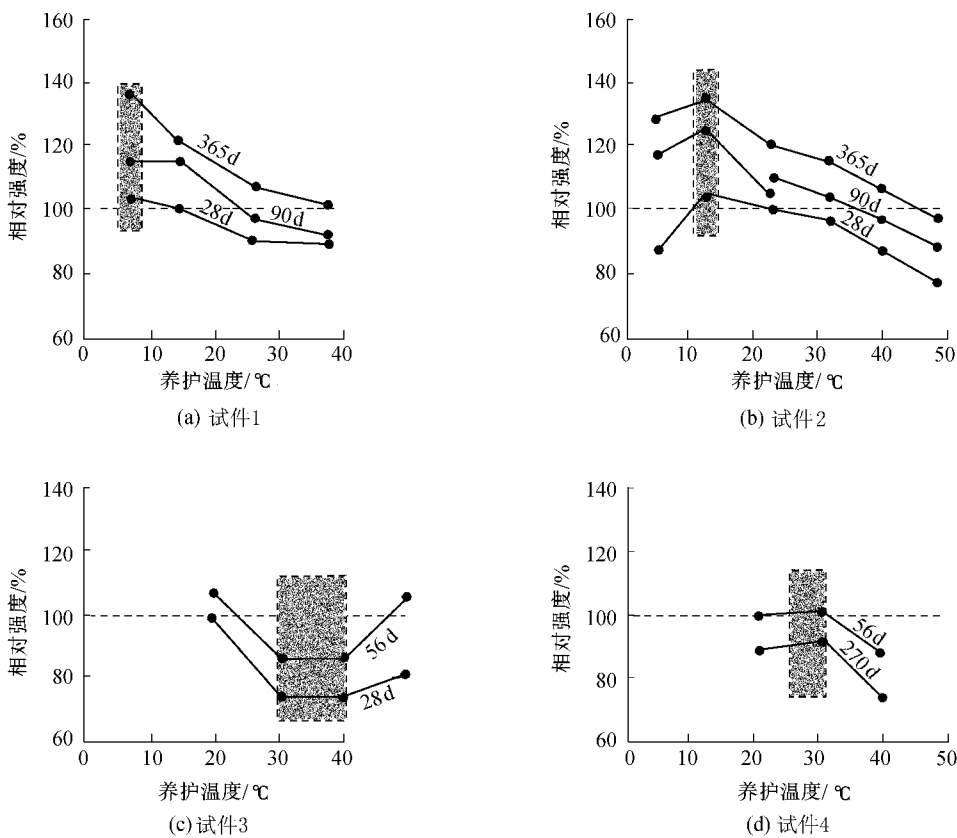


图 6 不同试件不同龄期养护温度对混凝土后期强度的影响

Fig.6 Effect of initial curing temperature on later-stage strength of concrete

剧烈干燥反而能够提高混凝土的后期强度,因为新浇混凝土早期还处于塑性阶段,能够适应其体积的变化而不致发生开裂,而且,早期的剧烈干燥实际上减少了有效水灰比,因此增大了混凝土的强度.在剧烈干燥的后期,混凝土凝结后不能再适应其体积的变化,因而内部出现裂缝,降低了混凝土的强度,甚至抵消了早期干燥所带来的强度增长的效应,因此暴露在炎热干燥气候下的混凝土实际上后期强度较低.在风速为20 km/h、相对湿度为30%、不同温度的试验条件下,早期蒸发时间对混凝土(350 kg/m³普通硅酸盐水泥)56 d强度的影响如图7所示.从图7可以看出,新浇混凝土的早期蒸发时间只有控制在1~2 h内,才能增强混凝土的后期强度,否则混凝土的后期强度反而降低.

2.4 凝胶体的非均质性理论

低温下的水化反应较慢,水化产物有足够的时间均匀地扩散和沉淀在水泥颗粒之间.当水化反应处于较高的温度时,由于水化反应较快,使水化产物不能均匀地沉淀,于是水化产物在水泥颗粒附近立刻沉淀下来,形成了一个稠密的凝胶体.在离这个水泥颗粒较远处,所形成的凝胶体稀疏而且多孔,凝胶体的稀疏部分恰恰决定了凝结后的混凝土的强度.因此,该理论可以解释高温对混凝土后期强度的不利效应.混凝土凝胶结构的温度效应机理见图8.

也有人认为,水泥颗粒周围相对稠密的凝胶层阻止了水化的进程,因此温度对混凝土后期强度的不利效应可归结为高温所导致的最终水化程度降低,但温度对最终水化程度几乎没有影响.

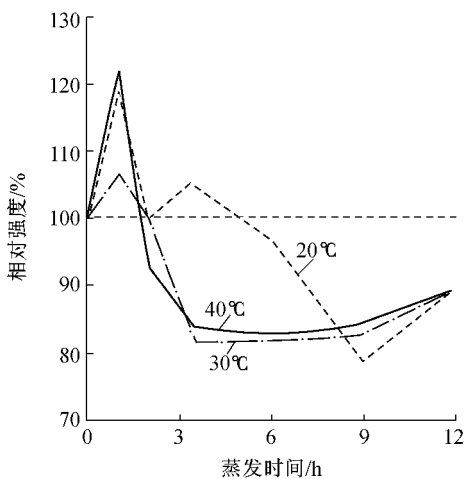


图 7 早期的蒸发时间与相对强度的关系

Fig.7 Variation of relative strength of concrete with time of evaporation at early stage

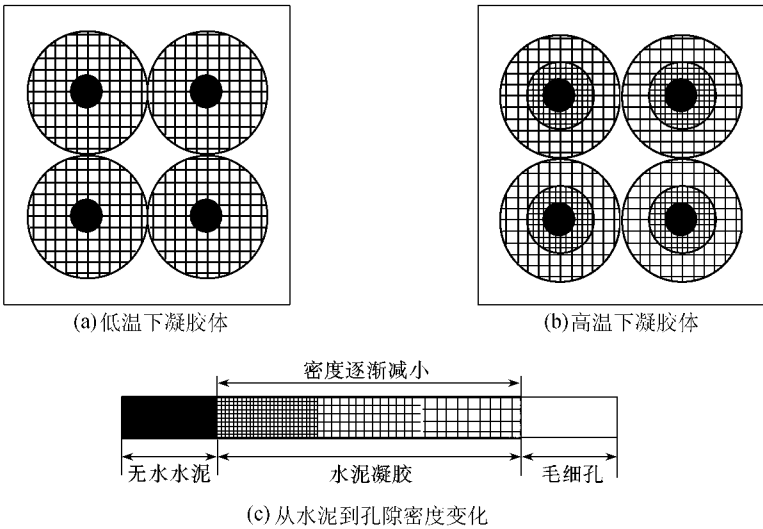


图 8 温度对凝胶结构均匀性的影响

Fig.8 Effect of temperature on the uniformity of gel structure

另外,不同型号的水泥在高温下水化生成的水化产物不同,对混凝土强度也有不同的影响.例如,使用抗硫酸盐水泥的混凝土在炎热干燥的气候条件下,其 360 d 强度比使用普通硅酸盐水泥混凝土高 20% ~ 26%.

3 温度与混凝土强度发展之间的关系

混凝土早期强度发展与混凝土的温度历史有很大的关系,可以用“成熟度”或“等效时间”表示,成熟度被用来描述时间和温度对混凝土强度发展的综合效应.在不同环境温度下拌和的混凝土,如果它们的成熟度相同,即使它们的温度历史不同,也具有相同的强度.成熟度函数有几种,其中得到广泛应用的有两种函数.

a. Nurse-Saul 函数^[7]

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \tag{4}$$

式中: M ——成熟度; T ——混凝土在 t 时间内的平均温度; T_0 ——基准温度.

Nurse-Saul 函数是基于经验基础上的,只适用于某些具体条件,当给定不同混凝土样品时,早期温度对混凝土强度发展的影响数据较分散.因此, Nurse-Saul 函数不能准确地反映养护温度对混凝土强度的影响,但因其形式简单而被广泛使用.

b. Arrhenius 函数^[8]

$$t_e = \sum \exp \left[Q \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \Delta t \tag{5}$$

式中: t_e ——等效时间; T ——在 t 时间间隔内混凝土的温度(绝对温度); Q ——常数, $Q = E/R$, E 为与化学活动能有关的常数, R 为气体常数($R = 8.3144 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$); T_r ——参考温度(绝对温度).

Arrhenius 函数被用来计算在参考温度下的“等效时间”. Arrhenius 函数优于 Nurse-Saul 函数被广泛采用,常数 Q 根据试验确定.后来,又提出了用速率常数表示等效时间的简单表达式

$$t_e = \sum \left(\frac{k_T}{k_r} \right) \Delta t \tag{6}$$

式中: k_T ——在 t 时间间隔内的温度 T 时的速率常数; k_r ——在参考温度 T_r 时的速率常数.

速率常数与温度之间的关系是用成熟度评价现场混凝土强度的关键,用温度表示的公式形式有 (a) 线性函数 (b) Arrhenius 函数 (c) 指数函数.人们发现,养护温度与混凝土最终强度之间不存在一一对应关系.但是,混凝土相对强度和等效时间之间的关系是唯一的,可表示为

$$\frac{S}{S_u} = \frac{k_r (t_e - t_{or})}{1 + k_r (t_e - t_{or})} \tag{7}$$

式中: S ——混凝土抗压强度; S_u ——混凝土的最终强度; t_e ——在参考温度下的等效时间; t_{or} ——在参考温度下混凝土强度开始发展时的时间; k_r ——在参考温度下的速率常数.

从式(7)可以看出,相对强度的发展是等效时间的一个双曲线函数,曲线的形状由参数 k_r 决定, k_r 的值等于曲线起始点处的斜率, k_r 的倒数等于参考温度下混凝土的相对强度达到 0.5 时超出 t_{or} 的等效时间.速率常数模型虽然可以通过试验定出参数从而评估混凝土相对强度,但是所提出的速率常数模型是否在各种温度条件下都有效还需要进一步研究.

4 结 语

由以上分析可知,温度对混凝土强度的影响并不是单一的,必须在具体条件下综合考虑各种因素,解释温度效应的机理虽然很多,但是高温炎热气候有利于混凝土的早期强度的发展,而不利于混凝土后期强度的事实还是得到了普遍的认可.

参考文献 :

[1] SOROKA I. Concrete in hot environment[M]. London : E & FN Spon ,1993. 119—141.
[2] 江见鲸,冯乃谦. 混凝土力学[M]. 北京 :中国铁道出版社 ,1991. 58.
[3] ALEXANDER K M , WARDLAN J , GILBERT D J. Aggregate cement bond , cement paste strength and the strength of concrete[A]. In : Structure of Concrete and its Behavior Under Load[C]. London : Cement and Concrete Association ,1968. 59—92.
[4] HSU T T C , SLATE F O. Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar[J]. ACI ,1963 ,60(4) :465—486.
[5] MEYERS S. How temperature and moisture content may affect the durability of concrete[J]. Pock Products ,1951 ,54(8) :153—157.
[6] GOTO S , ROY D M. The effect of W/C ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste[J]. Cement Concrete Res ,1981 ,11(4) :575—579.
[7] 张子明,冯树荣,石青春,等. 基于等效时间的混凝土绝热温升[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2004 ,32(5) :573—577.
[8] 张子明,宋智通,黄海燕. 混凝土绝热温升和热传导方程的新理论[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2002 ,30(3) :1—6.

Influences of temperature on strength of concrete

ZHANG Zi-ming , ZHOU Hong-jun , ZHAO Ji-kun

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on the micro- and macro-structure of concrete materials , an analysis was performed of the macro properties of concrete strength. The result shows that the strength of concrete is mainly determined by its porosity , and that the water-cement ratio determines the porosity and strength of concrete under the specified conditions. In consideration of the fact that the rise of environmental temperature accelerates the rates of hydration and water evaporation , retards the formation of the internal structure of concrete , and further results in some influences on the development of the early-stage and later-stage strength of concrete , an analysis was made on the theories about temperature effect on concrete strength , including the distribution theory of the porosity system , the theory of optimal contents of SO_3 , the internal cracking theory , the heterogeneity theory of gels , and the expression between temperature and strength of concrete. It is concluded that the rise of temperature accelerates the development of the early-stage strength , but retards the development of the later-stage strength of concrete , and that the influences of temperature on the strength of concrete should be considered by combination with some other factors.

Key words :concrete strength ; porosity ; water-cement ratio ; rate of hydration ; micro-mechanics ; relative strength