

郑海忠,严武建,石玉成,等.基于相似分析的不同围压-温度的混凝土抗压强度研究[J].地震工程学报,2020,42(6):1666-1673.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1666

ZHENG Haizhong, YAN Wujian, SHI Yucheng, et al. Compressive Strength of Concrete under Different Confining Pressures and Temperatures Based on Similarity Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1666-1673. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1666

基于相似分析的不同围压-温度的 混凝土抗压强度研究

郑海忠¹, 严武建^{1,2}, 石玉成^{1,2}, 卢育霞^{1,2}, 王 平^{1,2}, 李福秀¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了研究混凝土在不同的围压和温度耦合作用下的抗压强度,根据相似分析原理,对混凝土抗压强度 σ_{\max} 的控制参数进行无量纲化,得到相关的相似准数;以 C40 混凝土为例,进行有限元计算得到相似准数之间的关系。结果表明:抗压强度 σ_{\max} 和残余强度随着围压的增大而增加,且最大偏应力与围压呈线性关系;在围压小于 20 MPa 时,应力-应变曲线可以分成两段,而在围压大于 20 MPa 时,应力-应变曲线可以划分成三段,出现明显的屈服;在不同的围压作用下温度对抗压强度的影响明显不同,且最大偏应力与温度近似为线性关系;三个无量纲参数 σ_{\max}/E 、 F/E 和 $\alpha\theta$ 在三维坐标近似形成了一个平面,说明 σ_{\max}/E 随 $\alpha\theta$ 和 F/E 基本呈线性变化。

关键词: 相似分析; 混凝土; 抗压强度; 温度; 围压

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1666-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1666

Compressive Strength of Concrete under Different Confining Pressures and Temperatures Based on Similarity Analysis

ZHENG Haizhong¹, YAN Wujian^{1,2}, SHI Yucheng^{1,2}, LU Yuxia^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, LI Fuxiu¹
(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To study the compressive strength of concrete under the coupling action of different confining pressure and temperature, the control parameters of compressive strength σ_{\max} of concrete were processed with no-dimensions according to the similar analysis principle, and related similarity criteria were obtained. The relationship between those similarity criteria was obtained by finite element calculation, taking C40 concrete as an example. Results show that (1) The compressive strength σ_{\max} and residual strength increase with the increase of confining pressure, and

收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项项目(2019IESLZ05, 2014IESLZ01); 国家自然科学基金面上项目(51678545, 41472297); 国家重点研发计划课题(2017YFC1500906)

第一作者简介: 郑海忠(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土地震工程。E-mail: zhenghzh@126.com。

通信作者: 严武建(1980-), 男, 副研究员, 主要从事岩土地震工程及混凝土耐久性研究。E-mail: yanwj1980@126.com。

the maximum deviator stress is linear with the confining pressure; (2) When the confining pressure is less than 20 MPa, the stress-strain curve can be divided into two sections, and when the confining pressure is greater than 20 MPa, the stress-strain curve can be divided into three sections, showing obvious yield; (3) The influence of temperature on compressive strength is obviously different under different confining pressure, and the maximum deviator stress and temperature are approximately linear; (4) Three dimensionless parameters (σ_{\max}/E , F/E , and $\alpha\theta$) form a plane in the three-dimensional coordinate, which shows that σ_{\max}/E has a linear relationship with $\alpha\theta$ and F/E .

Keywords: similarity analysis; concrete; compressive strength; temperature; confining pressure

0 引言

相似分析是在控制一类物理现象或问题的物理量中,选定一组物理量作为基本量,并把它们取作单位系统,用以度量这类现象中的任何物理量,这样就得到了该物理量的大小数值不仅是无量纲的,而且能够明确地反映这类现象的本质^[1]。

由于随着地下作业深度的增加,深部的温度和围压力不断增大,对混凝土在采矿和地下工程等中的应用产生了重要的影响。因此,国内外学者对混凝土在不同温度和围压下的强度进行了大量的研究。阎蕊珍^[2]对 C40 混凝土在高温下的物理力学性能进行了研究,从微观、亚微观角度探讨了高温对混凝土强度影响的微观机理。王振波^[3]分析了在不同温度下混凝土微裂隙的产生和演变规律,提出了混凝土在温度下的损伤模型。田小草等^[4]进行了沥青混凝土在不同温度下的实验分析与数值计算。严武建等^[5]研究了在冻融循环作用下混凝土的力学性质。吴峰等^[6]运用 ANSYS 对混凝土在不同温度下的开裂进行了研究分析。徐彧等^[7]对混凝土在 20~1 000 °C 以及自然冷却和喷水冷却条件下的强度特性和变化规律进行研究。胡海涛等^[8]对高强度混凝土在高温下的力学特性进行了研究,并与普通强度 C30 混凝土进行了比较,得出了在高温下高强度混凝土的应力-应变全曲线公式。闫东明等^[9]对混凝土在不同围压下的抗压强度进行了分析,研究表明:随着围压的增大,抗压强度也随着增大。谢和平等^[10]根据围压在 0~40 MPa 混凝土的应力-应变规律建立了弹塑性损伤本构关系。覃丽坤等^[11]对常温 20 °C 及 200~600 °C 下混凝土力学特性进行了实验研究,建立了高温时混凝土破坏的准则。石蕴美^[12]对混凝土在高温作用后的冲击力学性能进行了实验研究与数值计算分析。张丹丽等^[13]对混凝土框架结构的抗震性能进行了实验研究,并对其进行了相应的评估。刘冕等^[14]对地震荷载作用下的

钢筋混凝土箱梁的复合受力特性进行了实验研究和分析。Douglas 等^[15]研究了混凝土中加入 GGBS 的力学性能,结果表明其加入混凝土中可以很好地提高混凝土的抗冻性能。Selleck 等^[16]研究了混凝土在冻融循环过程中的微裂隙发育及其损伤过程。Duan 等^[17]研究了棱柱状不同配比混凝土在单轴压力下的力学性能。Trtnik 等^[18]研究超声波脉冲速度与混凝土强度之间的关系。

在不同围压和温度作用下,混凝土的强度和破坏准则的研究已有不少成果,但用相似分析进行的研究比较少。因此,本文在现有研究的基础上采用相似分析和有限元计算方法,分析不同围压、温度条件下,并对混凝土中力学的控制参量进行分析和无量纲化,进一步从本质研究围压、温度和抗压强度之间的关系。

1 热传导分析

已知混凝土的几何形状,混凝土为菱柱形,可以用它的几何尺寸 l_1, l_2, l_3, \dots , 来表征。混凝土的主要材料特性是它的密度 ρ 、导热系数 λ 以及比热 c 。已知混凝土周围的初始温度为 T_0 , 而混凝土表面上的温度 T_w 是随着时间和位置变化的给定函数,其特征温度是 T_{w0} , 特征时间是 t_0 。根据实际情况,在使用温度 T 作为因变量时,会带来不必要的麻烦。因此,选用温度差 $\theta = T - T_0$ 为因变量。这样可更清楚地反映出热传导的本质,也便于计算。已经给定了初始温度 T_0 , 就相当于给定了初始温差 $\theta = 0$, 给定混凝土表面的 T_w 就等于在混凝土表面上给定了温度差 θ_w , 即

$$\theta_w = \theta_{w0} \cdot k \left(\frac{x_{iw}}{l}, \frac{t}{t_0} \right) \quad (1)$$

式中: k 为温度分布函数; l 为特征长度; x_{iw} 为表面空间位置坐标; θ_{w0} 为特征温差。

用温差 θ 表示的 Fourier 导热定律如下:

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (2)$$

所以,热传导问题具有如下的数学表述:

$$\begin{cases} \text{方程: } \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) \\ \text{初始条件: } t = 0; \theta = 0 \\ \text{边界条件: } x_i = x_{iw}, \theta = \theta_{w0} \cdot k \left(\frac{x_i}{l}, \frac{t}{t_0} \right) \end{cases} \quad (3)$$

假定混凝土是均匀的,它的密度为 ρ ,比热 c 和导热系数 λ 都是常数。可以从式(3)中可以看出,该问题的控制参数有如下几个,即

$$l_1, l_2, l_3, \dots, \rho c / \lambda, \theta_{w0}, t_0$$

所以,温差 θ 可以表示为空间坐标 x_i 和时间 t 以及上述控制参数的表达式:

$$\theta(x_i, t) = f \left(x_i, t; l_1, l_2, l_3, \dots; \frac{\rho c}{\lambda}; \theta_{w0}, t_0 \right) \quad (4)$$

又因所研究的混凝土尺寸比较小,所以认为混凝土上的温度随着坐标是不变的,即与空间位置无关。所以

$$\theta(t) = f \left(t; l_1, l_2, l_3, \dots; \frac{\rho c}{\lambda}; \theta_{w0} \right) \quad (5)$$

选取 l_1 、 θ_{w0} 和 t_0 作为基本量,将式(5)无量纲化,则可用相似准数表示为:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = f \left(\frac{t}{t_0}; \frac{l_2}{l_1}, \frac{l_3}{l_1}, \dots; \frac{\lambda t_0}{\rho c l_1^2} \right) \quad (6)$$

因选定混凝土的材料和温度的分布函数,所以 $\frac{\lambda t_0}{\rho c l_1^2}$ 为常数,所以温差 θ 是时间和混凝土特征尺寸之间的函数关系。为了进一步确定它们之间的关系,可以通过有限元计算分析。

2 应力分析

2.1 围压应力

一个物体在受到外力作用的时候会发生变形。物体内部的应力和应变的分布是由下面几方面的因素来控制的,即:

(1) 几何形状。根据前面的分析,混凝土的特征尺寸是 l_1, l_2, l_3, \dots 。

(2) 材料性质。假定混凝土是各向同性材料,则它的材料力学性质可以由弹性模量 E 和泊松比 ν 来描述。

(3) 载荷。研究的是混凝土在围压力作用它内部最大应力的变化规律,所以混凝土受到压力 F 的作用。

因此,在围压作用下混凝土的最大抗压强度

σ_{\max} 可以表示为如下形式:

$$\sigma_{\max} = g(l_1, l_2, l_3, \dots; E, \nu; F) \quad (7)$$

2.2 热应力

由于物体内部温度的升高,并且围压和竖向压力限制了物体内部质点之间的位移或者形变的约束,热膨胀导致了热应力。

如果在物体内部发生局部的温升,就会引起热膨胀,进一步使得局部的应力和应变发生变化,这种变化就是按照弹性波的形式向四周传播产生影响。这里,弹性波的传播和热传导现象具有不同的时间尺度。

一般情况下,弹性波传播速度的数量级可以用 $\sqrt{E/\rho}$ 来进行估算。假设表征物体大小的特征长度为 l ,则传播时间 t_{ew} 的数量级为

$$t_{ew} \approx \frac{l}{\sqrt{E/\rho}} \quad (8)$$

热传导时间 t_{hc} 的数量级为

$$t_{hc} \approx \frac{\rho c l^2}{\lambda} \quad (9)$$

对混凝土而言,以C40混凝土为例,如果假设它的特征长度 $l=1$,根据表1中的相关数据可以计算得:

$$t_{ew} = 1 / (3.25 \times 10^{10} / (2.4 \times 10^3))^{1/2} \text{ s} = 2.7 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$$t_{hc} = (2.4 \times 10^3 \times 0.97 \times 10^3 \times 1^2) / 2.33 \text{ s} = 9.9 \times 10^5 \text{ s}$$

两个特征时间的比值为:

$$t_{ew} / t_{hc} = (2.7 \times 10^{-4} \text{ s}) / (9.9 \times 10^5 \text{ s}) = 2.7 \times 10^{-10}$$

显然可以得出 $t_{ew} \ll t_{hc}$,两个特征时间相差十个数量级。由物体内部局部温度升高引起的应力和应变的变化及其迅速地传播到物体内部的各处,但热传导和其相比显得十分缓慢。因此热传导和弹性波这两种效应是可以解耦的,即:

一个热应力问题是可以分成两个步骤来求解的。首先,求出固体内部由于温度变化而引起热传导现象,进而确定温度的分布情况;然后,对已经知道温度分布的物体,求出由于热膨胀而引起的应力场。

因此,总应变 ϵ 是由应力引起的 ϵ^σ 和由温度引起的 ϵ^θ 这两部分组成,而且两者是可以进行线性相加的,即

$$\epsilon = \epsilon^\sigma + \epsilon^\theta \quad (10)$$

由于温度升高引起的 ϵ^θ 是体积应变,而没有切应变,所以只是法向应变,与温度升高成正比,即

$$\begin{cases} \text{法向: } \epsilon_x^\theta = \epsilon_y^\theta = \epsilon_z^\theta = \alpha\theta \\ \text{法向: } \gamma_{xy}^\theta = \gamma_{yz}^\theta = \gamma_{zx}^\theta = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: α 是体积膨胀系数。

从式(11)中可以看出, α 与 θ 是以乘积的形式出现的,所以混凝土在围压作用和温度变化的情况下最大抗压强度 σ_{\max} 可以表示为如下形式:

$$\sigma_{\max} = g(l_1, l_2, l_3 \dots; E, \nu; F; \alpha\theta) \quad (12)$$

取 l_1 、 E 为基本量,将式(12)无量纲化,用相似准数表示得

$$\frac{\sigma_{\max}}{E} = g\left(\frac{l_2}{l_1}, \frac{l_3}{l_1}, \dots; \nu, \frac{F}{E}; \alpha\theta\right) \quad (13)$$

式中: $\frac{l_2}{l_1}$ 、 $\frac{l_3}{l_1}$ 均表征混凝土相对尺寸的大小; $\frac{F}{E}$ 表征混凝土所受围压引起的变形大小; $\alpha\theta$ 表征由温度变化引起混凝土变形的大小。

为了进一步从本质上确定上述相似准数的关系,下面用有限元计算来进行分析。

3 有限元计算分析

本文以 C40 混凝土为例,仅讨论在不同围压和温度下混凝土抗压强度 σ_{\max} 的变化规律。建立混凝土有限元模型为 150 mm × 150 mm × 300 mm,网格尺寸为 10 mm,采用 C3D8R 单元,如图 1 所示。

C40 混凝土的材料性质参数和计算参数如表 1 所列。根据我国规范中的混凝土轴心受压参数,并

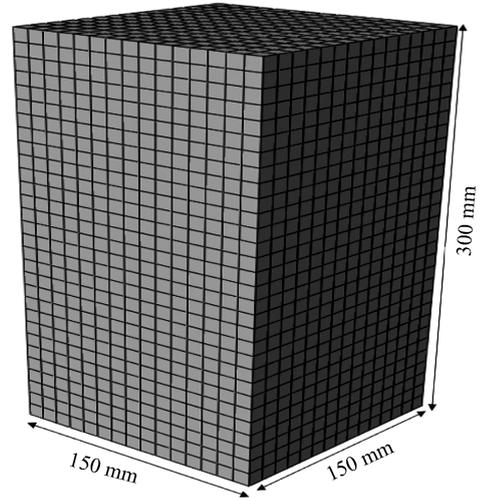


图 1 混凝土有限元模型及网格划分(单位:mm)
Fig.1 Concrete finite element model and mesh (Unit:mm)

利用其强度参数换算公式^[19],可以得到 C40 混凝土的轴心压缩计算参数如表 2 所列。本文采用混凝土损伤塑性模型来计算,根据该模型所参数需要以及混凝土结构设计规范(GB 50010-2010)^[20],可以得到 C40 混凝土损伤塑性模型的其他参数,如表 3 所列。

为了验证所建有限元模型和材料参数的正确性和可行性,首先计算得到单轴压缩时 C40 混凝土的抗压强度 σ_{\max} 为 25.13 MPa,与文献[16]所给出的 C40 混凝土轴心抗压强度一致,说明所建模型以及材料参数正确。其应力-应变曲线如图 2 所示。

表 1 C40 混凝土的材料性质参数

Table 1 Material properties of C40 concrete

名称	密度 ρ /(kg/m ³)	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	导热系数 λ /[W/(m·K)]	比热 c /[J/(kg·K)]	热膨胀系数 α /(/K)
参数	2 400	32.5	0.2	2.33	970	8.34×10^{-6}

表 2 C40 混凝土材料轴心压缩计算参数

Table 2 Calculation parameters of C40 concrete material under axial compression

抗压强度 /MPa	非弹性应变 /($\times 10^{-3}$)	受压损伤 因子/dc	抗拉强度 /MPa	开裂应变 /($\times 10^{-3}$)	受拉损伤 因子 dt
18.76	0.00	0.00	2.41	0.00	0.00
26.80	0.76	0.01	2.39	0.03	0.01
16.91	2.66	0.37	1.26	0.17	0.47
10.47	4.45	0.61	0.82	0.29	0.66
7.38	6.13	0.72	0.62	0.40	0.74
5.65	7.77	0.82	0.50	0.51	0.84
4.56	9.40	0.88	0.43	0.61	0.90
3.82	11.01	0.91	0.38	0.72	0.93
3.28	12.61	0.93	0.34	0.83	0.95
2.88	14.22	0.95	0.31	0.93	0.96
-	-	-	0.10	4.18	1.00

表3 C40混凝土损伤塑性模型的其他参数

Table 3 Other parameters of the damaged plasticity model of C40 concrete

膨胀角/(°)	偏心率	f_{bo}/f_{co}	K	黏性参数
30	0.1	1.16	0.666 7	0

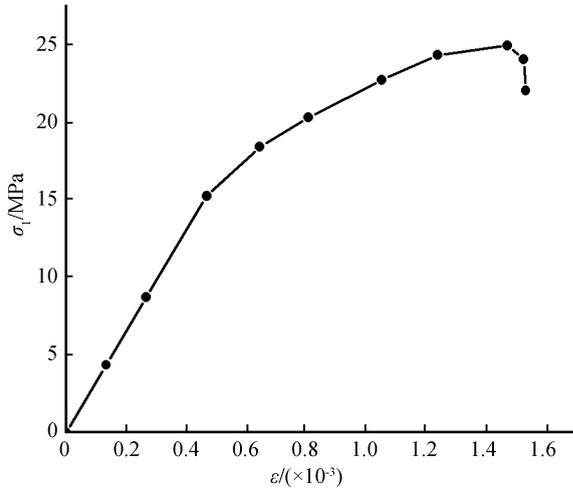


图2 单轴压缩应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve under uniaxial compression

3.1 C40混凝土抗压强度与围压关系

在初始温度下,即 $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在围压 σ_3 为 10、15、20、25 和 30 MPa 时,C40 混凝土偏应力-应变的关系曲线和最大偏应力与围压的关系如图 3 和 4 所示。从图中可以看出在开始阶段应力-应变呈直线,并随着围压的增加其斜率也越大;随后进入屈服阶段和破坏阶段,C40 混凝土达到抗压强度,随着围压的增加其抗压强度增大,两者近似成线性关系;同样,随着围压的增加,其残余强度也增加。

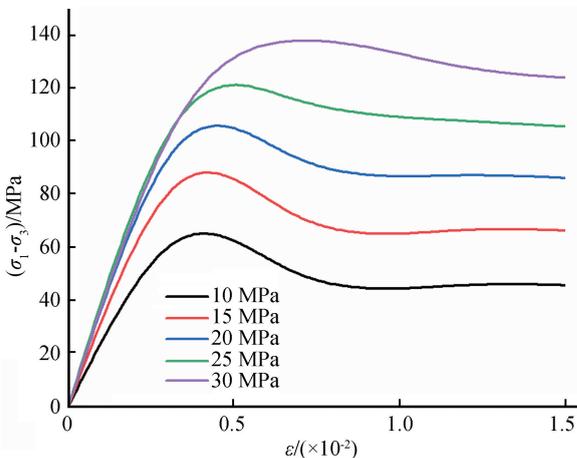


图3 不同围压时应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve under different confining pressures

3.2 围压-温度耦合作用对 C40 混凝土抗压强度的影响

根据实验分析结果表明,在温度升高时混凝土

的弹性模量会减小,C40 混凝土弹性模量随温度的变化规律可以用二次函数来拟合^[2],其表达式为

$$y = 42.76 - 0.091x + 5.23 \times 10^{-5}x^2 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.97, 20\text{ }^\circ\text{C} \leq x \leq 800\text{ }^\circ\text{C}$$

由于式(14)是以 C40HPC 混凝土为研究对象,因此,本文将式(14)中常数项进行适当地减小。

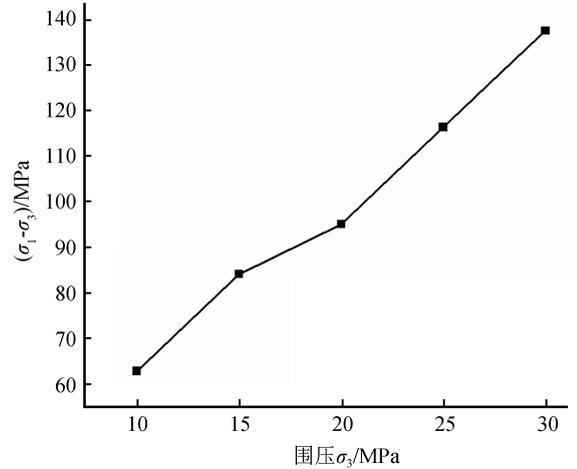


图4 在初始温度下 C40 混凝土的抗压强度与围压的关系

Fig.4 Relationship between compressive strength and confining pressure of C40 concrete at initial temperature

图 5 是在不同围压下,C40 混凝土在温度为 30、40、50、60、70 $^\circ\text{C}$ 时的应力-应变曲线。从图 5 可以看出,在围压小于 20 MPa 时,应力-应变曲线主要分成两段,第一段近似直线段,随着应变的增大,应力增大到最大值,第二段是随着应变的继续增大,应力逐渐减小并趋于稳定值,且随着围压的增大,应力随应变衰减的速率减小;同时,在围压小于 20 MPa 时,温度的变化只影响最大偏应力,且其最大值与温度的变化规律与围压有密切关系。在围压大于 20 MPa 时,应力-应变曲线可以分为三段,第一段为应力随着应变快速增大,第二段为应力随应变增加的速度相对较小,即出现明显的屈服点,随着应变的增大,偏应力达到最大值,第三段为随着应变的继续增加,应力逐渐减小并趋于稳定值;在该围压范围内,温度的变化主要影响屈服点的偏应力和最大偏应力。

图 6 是不同围压作用时最大偏应力与温度的变化关系。从图中可以看出,在不同围压下,最大偏应力随温度的变化关系明显不同,在围压为 10、25 和 30 MPa 时,最大偏应力随着温度的增大而增大,两者近似呈线性增长;在围压为 15 和 20 MPa 时,最大偏应力随着温度的增大而出现衰减,两者之间的

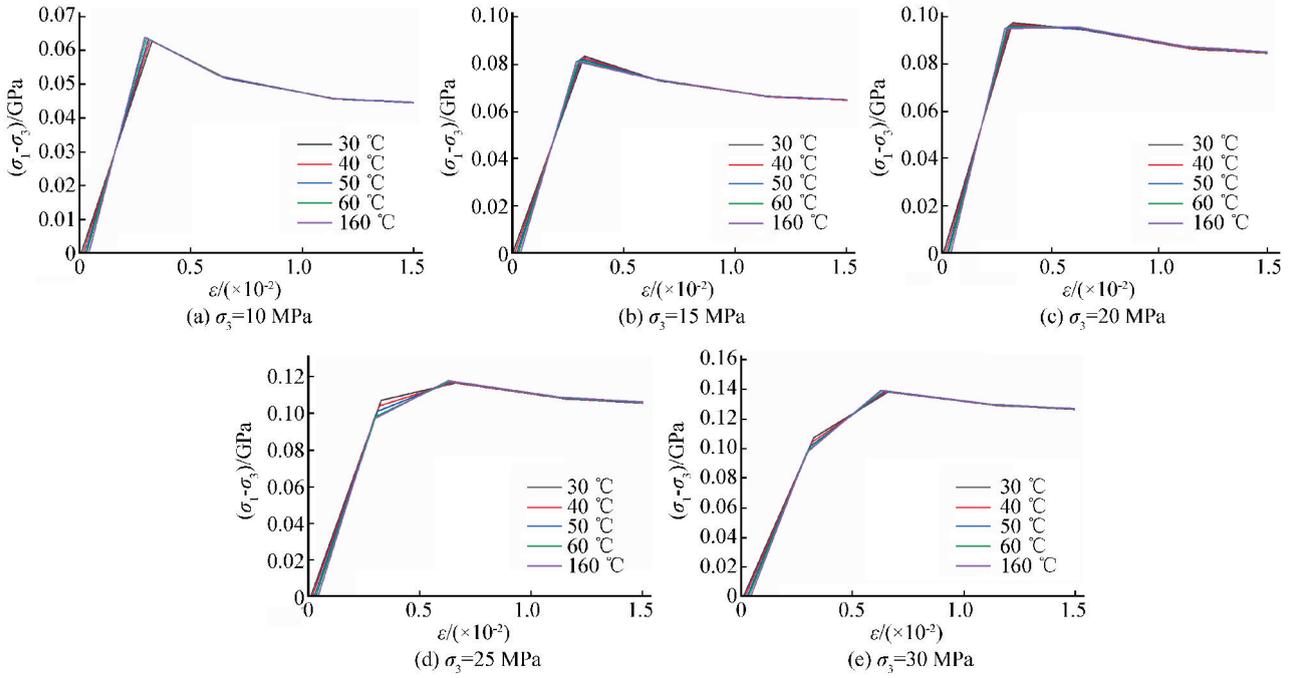


图 5 不同围压作用时不同温度下的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves at different temperatures under different confining pressure

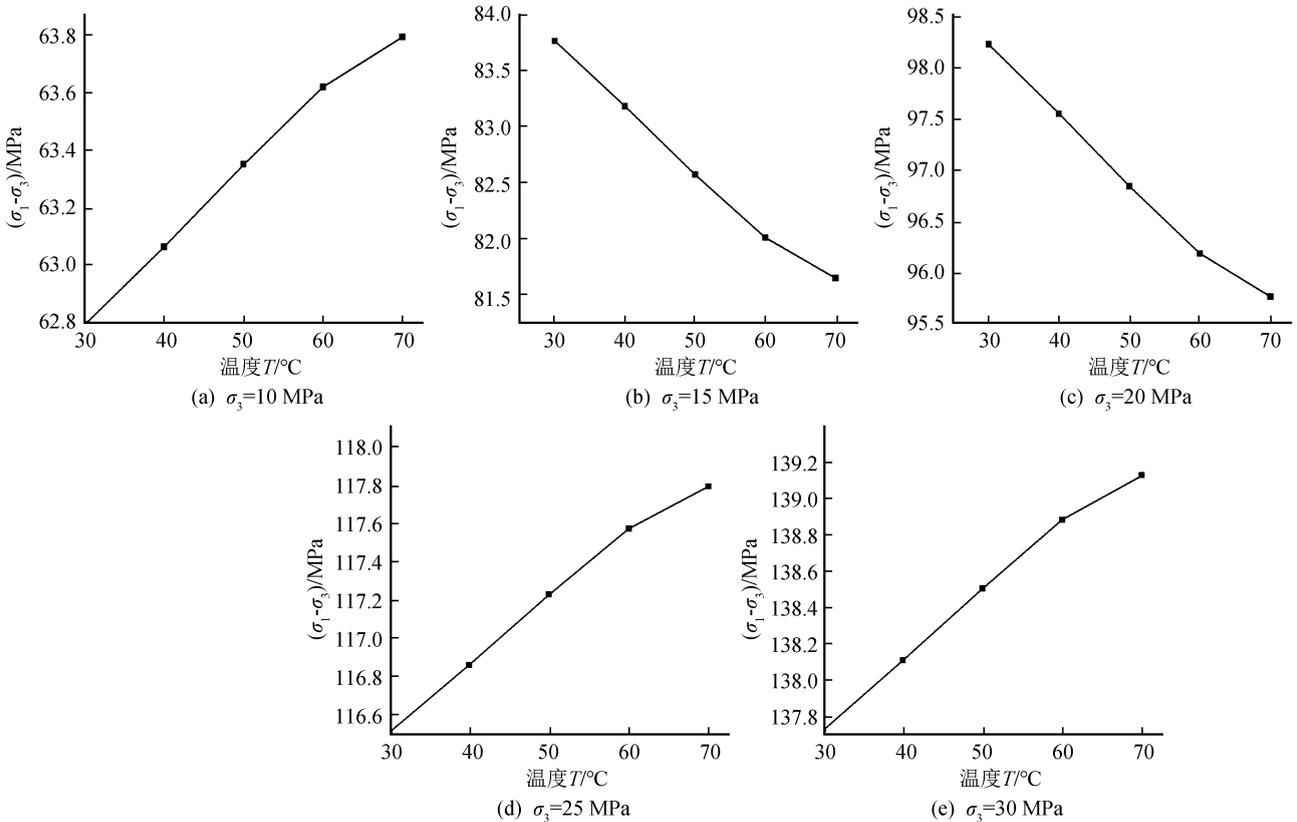


图 6 不同围压作用时抗压强度与温度的关系

Fig.6 Relationship between compressive strength and temperature under different confining pressures

关系也近似为线性。当围压为 10 MPa 时,温度从 30 °C 开始,每升高 10 °C,最大偏应力的相对变化量

分别为:0.43%、0.45%、0.42%和 0.27%;当围压为 15 MPa 时,温度从 30 °C 开始,每升高 10 °C,最大偏

应力的相对变化量分别为： -0.70% 、 -0.73% 、 -0.68% 和 -0.44% ；当围压为 20 MPa 时，温度从 30 °C 开始，每升高 10 °C，最大偏应力的相对变化量分别为： -0.69% 、 -0.73% 、 -0.68% 和 -0.44% ；当围压为 25 MPa 时，温度从 30 °C 开始，每升高 10 °C，最大偏应力的相对变化量分别为： 0.30% 、 0.32% 、 0.29% 和 0.19% ；当围压为 30 MPa 时，温度从 30 °C 开始，每升高 10 °C，最大偏应力的相对变化量分别为： 0.28% 、 0.29% 、 0.27% 和 0.17% 。可以看出，在围压为 15 和 20 MPa 时其最大偏应力随温度增加的相对减小量基本相等，而在围压为 10、25 和 30 MPa 时最大偏应力随温度增大而增大的过程中，其相对增量随围压的增大而减小。

3.3 相似分析

本文不考虑混凝土尺寸效应对其抗压强度的影响，同时 C40 混凝土材料泊松比保持不变，因此式 (13) 可以写成

$$\frac{\sigma_{\max}}{E} = g\left(\frac{F}{E}; \alpha\theta\right) \quad (15)$$

图 7 是三个无量纲参数 σ_{\max}/E 与 F/E 和 $\alpha\theta$ 的关系，可以从图中看出三个无量纲参数在空间中基本构成一平面， σ_{\max}/E 与 F/E 和 $\alpha\theta$ 之间为线性关系。

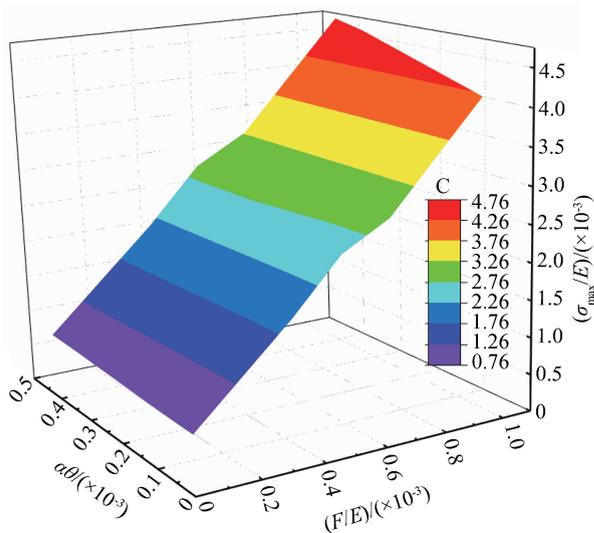


图 7 σ_{\max}/E 与 F/E 和 $\alpha\theta$ 的关系

Fig.7 Relationship between σ_{\max}/E and $\alpha\theta$, F/E

4 结论

本文根据相似分析原理，对混凝土抗压强度的控制参数进行无量纲化，得到相似准数，并利用有限元对不同围压与温度耦合作用下混凝土强度进行计算。主要得到了以下结论：

(1) 在混凝土中热传导和热应力是两种不同的效应，它们的传播特征时间相差数个数量级，所以这两种效应可以进行解耦，即先计算热传导的分布，再计算热应力效应。

(2) 混凝土的抗压强度随着围压的增大而增加，其残余强度也随着围压的增加而增大，且最大偏应力与围压近似呈线性关系。

(3) 在围压和温度的耦合作用下，当围压小于 20 MPa 时，应力-应变曲线可以分成两个不同的阶段，而围压大于 20 MPa 时，应力-应变曲线可以分成三个不同的阶段，出现明显的屈服，且在不同的围压下温度对最大偏应力的影响不同。

(4) 三个无量纲参数 σ_{\max}/E 、 $\alpha\theta$ 和 F/E 之间在三维坐标中近似为一平面，说明 σ_{\max}/E 与 $\alpha\theta$ 和 F/E 呈线性关系。

参考文献(References)

- [1] 谈庆明.量纲分析[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2005.
TAN Qingming. Dimensional Analysis[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2005.
- [2] 阎蕊珍.高温对 C40 高性能混凝土物理力学性能的影响[D].太原:太原理工大学,2015.
YAN Ruizhen. Influence of High Temperature on Physical and Mechanical Properties of C40 High Performance Concrete[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [3] 王振波.混凝土温度损伤模型研究[D].南京:河海大学,2001.
WANG Zhenbo. Study of Damage for Concrete under Temperature[D]. Nanjing: Hohai University, 2001.
- [4] 田小革,应荣华,郑健龙.沥青混凝土温度应力试验及其数值模拟[J].土木工程学报,2002,35(3):25-30.
TIAN Xiaoge, YING Ronghua, ZHENG Jianlong. Tests on Thermal Stress in Asphalt Cement Sample and Its Numerical Simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(3): 25-30.
- [5] 严武建,牛富俊,吴志坚,等.冻融循环作用下聚丙烯纤维混凝土的力学性能[J].交通运输工程学报,2016,16(4):37-44.
YAN Wujian, NIU Fujun, WU Zhijian, et al. Mechanical Property of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete under Freezing-thawing Cycle Effect[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(4): 37-44.
- [6] 吴峰,苏超.基于 ANSYS 的混凝土温度裂缝控制仿真分析[J].工程建设与设计,2005(6):38-40,91.
WU Feng, SU Chao. Simulation Analysis of Concrete Temperature Cracking Control Based on ANSYS Software[J]. Construction & Design for Project, 2005(6): 38-40, 91.
- [7] 徐彧,徐志胜.高温作用后混凝土强度试验研究[J].混凝土,2000(2):44-45,53.
XU Yu, XU Zhisheng. Experiment Investigation of Strength of Concrete after High Temperature[J]. Concrete, 2000(2): 44-45-53.

- 45,53.
- [8] 胡海涛,董毓利.高温时高强混凝土强度和变形的试验研究[J].土木工程学报,2002,35(6):44-47.
HU Haitao, DONG Yuli. Experimental Research on Strength and Deformation of High-strength Concrete at Elevated Temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 44-47.
- [9] 闫东明,林皋.三向应力状态下混凝土强度和变形特性研究[J].中国工程科学,2007,9(6):64-70.
YAN Dongming, LIN Gao. Behavior of Concrete under the Tri-axial Compression[J]. Engineering Science, 2007, 9(6): 64-70.
- [10] 谢和平,董毓利,李世平.不同围压下混凝土受压弹塑性损伤本构模型的研究[J].煤炭学报,1996,21(3):265-270.
XIE Heping, DONG Yuli, LI Shiping. Study of a Constitutive Model of Elasto Plastic Damage of Concrete in Axial Compression Test under Different Pressures[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 265-270.
- [11] 覃丽坤,宋玉普,王玉杰等.高温对混凝土力学性能影响的试验研究[J].混凝土,2004(5):9-11.
QIN Likun, SONG Yupu, WANG Yujie, et al. Testing Research of Mechanics Characteristics of Concrete Affected by High Temperature[J]. Concrete, 2004(5): 9-11.
- [12] 石蕴美.混凝土高温后冲击压缩性能试验及数值模拟研究[D].西安:长安大学,2017.
SHI Yunmei. Experimental and Numerical Simulation of Impact Compression of Concrete after High Temperature[D]. Xi'an: Changan University, 2017.
- [13] 张丹丽,谢强.基于不同地面特性的混凝土框架结构的抗震性能评估[J].地震工程学报,2018,40(6):1259-1265.
ZHANG Danli, XIE Qiang. Seismic Performance Evaluation of Concrete Frame Structures Based on Different Ground Characteristics[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1259-1265.
- [14] 刘觅,高亮.地震环境下钢筋混凝土箱梁复合受力特性分析[J].地震工程学报,2018,40(4):665-670.
LIU Mi, GAO Liang. Composite Mechanical Characteristics of Reinforced Concrete Box Girders in Earthquake Environments[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 665-670.
- [15] Douglas E, Bilodeau A, Malhotra VM. Properties and Durability of Alkali-Activated Slag Concrete[J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(5): 509-516.
- [16] SELLECK S F, LANDIS E N, PETERSON M L, et al. Ultrasonic Investigation of Concrete with Distributed Damage[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(1): 27-36.
- [17] DUAN A, JIN W L, QIAN J R. Effect of Freeze-thaw Cycles on the Stress-strain Curves of Unconfined and Confined Concrete[J]. Materials and Structures, 2011, 44(7): 1309-1324.
- [18] TRTNIK G, KAVČIČ F, TURK G. Prediction of Concrete Strength Using Ultrasonic Pulse Velocity and Artificial Neural Networks[J]. Ultrasonics, 2009, 49(1): 53-60.
- [19] 过镇海.混凝土的强度和本构关系[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
GUO Zhenhai. Strength and Constitutive Relationship of Concrete[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. Concrete Structure Design Specification [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.