

文章编号: 1000-4750(2013)11-0120-07

# 水泥混凝土路面设计极限状态方程的探讨

张海涛, 张广阔

(东北林业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 水泥混凝土路面结构设计标准是行车荷载疲劳应力与温度疲劳翘曲应力之和不超过水泥混凝土材料的极限弯拉疲劳强度, 现行水泥混凝土路面设计规范(JTG-D40-2002)的设计极限状态方程  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  中的极限应力与疲劳应力等部分指标力学概念有误, 如方程中存在荷载力与温度力的概念不统一, 极限应力与疲劳应力概念有误且不统一及疲劳修正系数修正有误等问题, 通过对设计方程中各项指标及系数的力学原理研究, 对设计极限状态方程进行了修正, 采用国内研究的几个主要水泥混凝土试验疲劳方程, 通过进一步的力学原理分析及设计疲劳方程对比研究, 得出了比较合理的水泥混凝土路面设计极限状态方程修正公式, 即  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f'_r = \frac{f_r}{k_f} (\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm})$ , 并且用算例进行了对比设计, 取得了比较满意的设计结果, 研究得出了现行规范公式设计板厚偏小的结论, 为水泥混凝土路面板的断裂提供了一定理论依据, 研究结果论证了修正公式的正确性。

**关键词:** 水泥混凝土路面; 设计标准; 疲劳方程; 极限应力; 疲劳应力

中图分类号: U416.216 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0405

## STUDY ON THE FORMULA OF THE CONCRETE FATIGUE IN CEMENT CONCRETE PAVEMENT DESIGN

ZHANG Hai-tao, ZHANG Guang-kuo

(College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** The design standards of the cement concrete pavement are that the vehicle fatigue stress and the temperature fatigue stress are less or equal to the maximum fatigue strength of the concrete. There are some incorrect mechanical concepts on the maximum stress and the fatigue stress in the design fatigue formula of  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  in the specifications of cement concrete pavement design for highway (JTGD40-2002). The formula have some inconsistencies, for example, the vehicle load and the temperature load are inconsistent, the mechanical concepts on the maximum stress and the fatigue stress are incorrect, and the fatigue coefficients are incorrect. Through mechanical and comparative research on the design indexes and the fatigue coefficients in the formula, the formula has been modified, and the paper has put forward the modified formula based on several important concrete fatigue formula in China, i.e.  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f'_r = \frac{f_r}{k_f} (\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm})$ .

Meanwhile, the comparative design has been finished between the specification formula and the modified formula, and it is concluded that the thickness of the concrete slab by current design is relatively small, explaining the occurrence of concrete slab cracking.

**Key words:** cement concrete pavement; design standard; fatigue formula; maximum stress; fatigue stress

收稿日期: 2012-06-06; 修改日期: 2012-09-27

通讯作者: 张海涛(1963—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 从事路面结构与材料研究(E-mail: zht6781@163.com).

作者简介: 张广阔(1990—), 男, 河南郑州人, 研究生, 从事道路工程研究(E-mail: 1161051378@qq.com).

水泥混凝土路面设计标准是板的荷载疲劳应力与温度疲劳应力之和不超过水泥混凝土极限弯拉疲劳强度,国内外基本都采用这一力学原理进行设计,现行规范(JTG-D40-2002)与94年规范相比,设计标准没有改变,只是在设计中引入可靠度概念,通过力学理论研究,认为规范极限状态方程  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  存在一些问题,不符合相关力学理论,因此,对此问题进行了深入的研究,对  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  进行了修正,修正公式与规范公式进行了设计对比,从多个角度论证了修正公式的正确性<sup>[1-6]</sup>。

## 1 $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$ 的荷载力与温度力

### 1.1 荷载力与温度力存在的问题

水泥混凝土路面设计标准如表1所示,按照现行规范要求,水泥混凝土路面设计标准以疲劳应力为板破坏依据。

表1 水泥混凝土路面设计标准

Table 1 Design Standard of Cement Concrete Pavement

	表达式	备注
设计极限状态方程	$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$	$\gamma_r$ —可靠度系数
$\sigma_{pr}$	$\sigma_{pr} = k_r k_t k_c \sigma_{ps}$	荷载疲劳应力
$\sigma_{tr}$	$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$	温度疲劳应力
$f_r$	$f_r = \frac{P_m l}{bh^2}$	水泥混凝土梁试验

极限状态方程  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  中,计算  $\sigma_{pr}$  的荷载力采用标准轴载(BZZ-100)的等效荷载力  $P_s$ ,得到的  $\sigma_{pr}$  是等效荷载疲劳应力,而计算  $\sigma_{tm}$  的温度力采用的是最大温度梯度 ( $T_g$ ) 下的最大温度力(不是等效温度力),  $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$  中的系数  $k_t$  规范定义为疲劳修正系数,似乎与等效概念没有关系,因此,极限状态方程  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  中存在荷载力与温度力不统一的问题。

### 1.2 荷载力与温度力的统一

与标准轴载(BZZ-100)的等效荷载力  $P_s$  统一,  $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$  计算也应该采用等效温度力,而现行规范  $\sigma_{tm}$  是采用最大温度梯度 ( $T_g$ ) 下的最大温度力计算得到最大(极限)温度疲劳应力,因此,应该使  $\sigma_{tr}$  与  $\sigma_{pr}$  具有相同的等效概念,修正方法如下:

1)  $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$  中的系数  $k_t$  规范定义为疲劳修正系数,得到的  $\sigma_{tr}$  似乎是温度疲劳应力,但实际上  $\sigma_{tm}$  本身就是温度疲劳应力( $\sigma_{tm}$  准确定义应是

50年一遇的最大温度疲劳应力),  $k_t$  不具有疲劳修正意义而具有等效或等效疲劳修正意义,因此,

$$k_t = \frac{f_r}{\sigma_{tm}} \left[ a \left( \frac{\sigma_{tm}}{f_r} \right)^c - b \right]$$

的定义应该是等效温度疲劳应力修正系数(折减系数),即最大温度疲劳应力  $\sigma_{tm}$  通过  $k_t$  修正得到等效温度疲劳应力  $\sigma_{tr}$ 。

2) 上面方法是  $\sigma_{tm}$  通过  $k_t$  等效修正得到等效温度疲劳应力  $\sigma_{tr}$ ,也可以直接采用等效温度梯度 ( $T'_g$ ) 计算等效温度疲劳应力  $\sigma_{tr}$ ,同济大学曾做过等效温度梯度 ( $T'_g$ ) 方面的研究(如表2所示),可以看出,通过  $k_t$  修正得到的等效温度梯度 ( $k_t \times T_g$ ) 与  $T'_g$  很接近,说明两个方法都可行<sup>[7]</sup>。

表2 最大温度梯度值 ( $T_g$ ) 与等效温度梯度值 ( $T'_g$ )

Table 2 Maximum and equivalent temperature gradients ( $T_g$ )

and ( $T'_g$ )

自然区划	II	III	IV	V	VI	VII
$T_g$	83~88	90~95	86~92	83~88	86~92	93~98
$k_t \times T_g$	44~47	48~51	46~49	44~47	46~49	50~52
$T'_g$	42~50	46~50	40~50	40~50	48~56	48~60

注:  $k_t = 0.532$ (规范算例)。

$k_t$  也可以采用规范公式平均值,  $k_t$  的具体数据计算结果如表3所示,可以看出,  $k_t$  的平均值是0.533,与规范算例相同。

表3 温度疲劳应力系数  $k_t$  计算结果

Table 3 Calculating results of the temperature fatigue stress coefficient  $k_t$

	$\sigma_{tm}$	$\frac{f_r}{\sigma_{tm}} \left( \frac{\sigma_{tm}}{f_r} \right)$	$k_t$
$a=0.850$	$0.25f_r$	4 (0.25)	0.381
$b=0.040$	$0.50f_r$	2 (0.50)	0.598
$c=1.326$	$f_r$	1 (1)	0.810
$\bar{k}_t$		0.533	

## 2 $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$ 极限应力与疲劳应力

### 2.1 极限应力与疲劳应力存在的问题

按规范定义,极限状态方程  $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$  中的  $\sigma_{pr}$ 、 $\sigma_{tr}$  及  $f_r$  都应该是疲劳应力,但按力学理论,公式中只有  $\sigma_{tr}$  是疲劳应力,而  $\sigma_{pr}$  与  $f_r$  是极限应力(规范认为是疲劳应力),实际上  $\sigma_{pr} = k_r k_t k_c \sigma_{ps}$  中的  $\sigma_{ps}$  本身就是疲劳应力(规范认为是极限应力),

不需要 $k_f$ 的修正,因此, $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r$ 中的极限应力与疲劳应力概念有悖且不统一<sup>[8-9]</sup>。

## 2.2 极限应力与疲劳应力的统一

### 2.2.1 $\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps}$ 中的 $\sigma_{pr}$ 与 $\sigma_{ps}$ <sup>[10]</sup>

按规范定义, $\sigma_{pr}$ 是标准轴载 $P_s$ 在临界荷位处产生的荷载疲劳应力, $\sigma_{ps}$ 是标准轴载 $P_s$ 在四边自由板的临界荷位处产生的荷载极限应力,但是,通过研究 $\sigma_{ps}$ 的力学原理,认为 $\sigma_{ps}$ 本身就是荷载疲劳应力,因为 $P_s$ 是(等效)疲劳荷载(不是最大荷载),即 $\sigma_{pr}$ 与 $\sigma_{ps}$ 的疲劳应力概念是相同的,只是在考虑接缝应力折减系数( $k_r$ )及偏载动载综合系数( $k_c$ )的影响等方面有所区别。

### 2.2.2 $\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps}$ 中的 $k_f$ <sup>[11]</sup>

按规范定义, $k_f$ 是设计基准期内(标准轴载 $P_s$ 作用 $N_e$ 次)荷载应力 $\sigma_{ps}$ (规范认为 $\sigma_{ps}$ 不是疲劳应力)累计作用的疲劳应力系数, $k_f = N_e^n$ ( $n=0 \sim 1 > 0$ ),似乎荷载疲劳应力 $\sigma'_{ps} = k_f \sigma_{ps}$ ,其实,按力学理论可知, $\sigma_{ps}$ 本身就是标准轴载 $P_s$ 作用下产生的荷载疲劳应力(对应疲劳次数 $N_e$ ),不需要考虑疲劳应力系数 $k_f$ 的影响,而真正需要考虑疲劳应力系数 $k_f$ 影响的是水泥混凝土极限弯拉强度 $f_r$ ,因为,按规范定义, $f_r$ 是用水泥混凝土梁试验确定的极限弯拉强度(试验是在一次荷载作用下将试件折断,因此, $f_r$ 是极限应力),按此结论,水泥混凝土极限弯拉疲劳强度应该是 $f'_r = \frac{f_r}{k_f}$ (即疲劳方程 $\sigma_{\max} = (a - b \lg N_e) f_r$ 的结果),因此,极限状态方程应该修正为:

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f'_r = \frac{f_r}{k_f}, \quad (1)$$

$$(\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm})$$

式(1)中的具体参数需要重新确定,对此结论的正确性在下面做进一步的论证。

### 2.2.3 $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ 中的 $\sigma_{tr}$ 与 $\sigma_{tm}$ <sup>[12-14]</sup>

按规范定义, $\sigma_{tm}$ 是最大温度梯度( $T_g$ )时在混凝土板产生的温度翘曲应力,按力学原理, $\sigma_{tm}$ 应该是温度周期变化的极限温度疲劳翘曲应力,按1.2的结论, $\sigma_{tr}$ 是修正后( $k_t \sigma_{tm}$ )的等效温度疲劳翘曲应力,不需要考虑疲劳应力系数的影响,即临界荷位处的等效温度疲劳翘曲应力 $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ , $k_t$ 是等

效温度疲劳应力修正(折减)系数(而不是规范所定义的疲劳应力系数), $k_t$ 是否沿用现行规范公式及参数有待于做进一步的理论及试验研究。

通过对极限状态方程中各项应力的理论研究,修正公式力学概念如表4所示。

表4 修正设计标准指标的力学概念  
Table 4 Mechanical concept of the index in correct design standard

修正极限状态方程	$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f'_r = \frac{f_r}{k_f} (\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm})$		
极限应力			$f_r$
疲劳应力	$\sigma_{pr}, \sigma_{ps}$	$\sigma_{tr}, \sigma_{tm}$	$f'_r = \frac{f_r}{k_f}$

## 3 修正极限状态方程的论证

### 3.1 $f'_r = \frac{f_r}{k_f}$ 的进一步论证

1) 沥青路面结构层弯拉应力控制指标为:

$$\sigma_m \leq \sigma_R, \quad \sigma_R = \frac{\sigma_{sp}}{k_s} \quad [15] \quad (2a)$$

式(2a)中: $\sigma_m$ 与 $\sigma_R$ 是疲劳应力;而 $\sigma_{sp}$ 是路面材料极限弯拉强度; $k_s$ 是标准轴载 $P_s$ 累计作用 $N_e$ 次的疲劳应力系数,因此:

$$k_s = a N_e^b \quad (2b)$$

2) 水泥混凝土路面设计规范(JTJ 012-84)采用的水泥混凝土疲劳方程为:

$$\sigma_{\max} = (0.94 - 0.077 \lg N_e) f \quad [16] \quad (3a)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{f}{k_1}, \quad k_1 = \frac{1}{0.94 - 0.077 \lg N_e} \quad (3b)$$

3) 民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范(MHJ 5004-95)采用的疲劳方程为:

$$\sigma_{\max} = (0.885 - 0.063 \lg N_e) f \quad [17] \quad (4a)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{f}{k_2}, \quad k_2 = \frac{1}{0.885 - 0.063 \lg N_e} \quad (4b)$$

可以看出,式(2a)~式(4b)的三种极限应力与疲劳应力的修正力学原理和修正公式 $f'_r = \frac{f_r}{k_f}$ 结论相同,进一步论证了修正公式的正确性。

### 3.2 $f'_r = \frac{f_r}{k_f}$ 与 $\sigma'_{ps} = k_f \sigma_{ps}$ 对比论证

采用规范数据计算 $k_f = N_e^n$ (如表5所示)。

表 5 荷载疲劳应力系数  $k_f = N_e^n$  计算结果

Table 5 Calculating results of the vehicle fatigue stress coefficient  $k_f = N_e^n$

$N_e / (\times 10^4)$	$n$	$k_f = N_e^n$
3~2000	0.057~0.065	1.799~2.982

从计算结果可以得出  $k_f > 1.0$  (数值在 2.0 左右), 因为疲劳应力应该小于极限应力 ( $\sigma_{\text{疲劳}} \leq \sigma_{\text{极限}}$ ), 可以证明现行规范的荷载疲劳应力  $\sigma'_{ps} = k_f \sigma_{ps}$  是错误的, 从而也论证了修正公式  $f'_r = \frac{f_r}{k_f}$  的正确性。

### 3.3 修正极限状态方程的合理性

$k_f$  对  $f_r$  的修正说明水泥混凝土板在实际工作状态中承受的荷载累计作用疲劳次数与  $\sigma_{pr}$  对应的疲劳作用次数相同 ( $N_e$ ), 因此, 用  $k_f$  对  $f_r$  修正是合理的; 另一方面, 公式  $\sigma_{tr}$  的温度周期变化累计次数与  $\sigma_{pr}$  的  $N_e$  虽然不同, 但取  $\sigma_{pr}$  与  $\sigma_{tr}$  之和表示在最不利情况下两种外力的综合疲劳作用, 产生的综合疲劳应力是最大的, 因此, 修正极限状态方程是合理的。

## 4 修正极限状态方程具体表达式研究

修正极限状态方程(式(1))只是基本形式, 具体采用哪种表达式及参数, 需要通过研究不同的水泥混凝土疲劳方程来确定。

### 4.1 修正极限状态方程表达式及参数确定

水泥混凝土疲劳方程基本分为考虑与不考虑低应力的单对数或双对数形式, 针对国内研究情况, 从浙江疲劳方程开始, 以同济大学疲劳方程为主, 研究合理的修正极限状态方程表达式及参数。

浙江疲劳方程表达式为:

$$\sigma_{\max} = (0.94 - 0.077 \lg N_e) f \quad (5)$$

式(5)是不考虑低应力(或相当于应力比  $R=0.1$ )的单对数形式, 同济大学研究的疲劳方程是考虑低应力的双对数形式, 原始表达式为:

$$\lg \frac{\sigma_{\max}}{f} = \lg a - 0.0422(1 - R) \lg N_e \quad (6)$$

式(6)改变应力变量后的表达式为:

$$\lg \frac{S(1-R)}{1-SR} = \lg \frac{\sigma_p}{f - \sigma_t} = \lg a - b \lg N_e \quad (7a)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \sigma_{\max} = \sigma_p + \sigma_t, \sigma_{\min} = \sigma_t \quad (7b)$$

通过式(7a)~式(7b)的推导, 可以得到:

$$\frac{1}{a} N_e^b \sigma_p + \sigma_t = f \quad (8)$$

式(8)是现行规范极限状态方程的初形, 改变应力变量是为了消除公式的  $R$  而方便推导轴载换算公式, 但作为强度储备的  $(f - \sigma_t)$  将两个不同力学概念的应力  $f$  (极限应力)与  $\sigma_t$  (疲劳应力)放在一起不符合力学理论; 另一方面, 混凝土板的破坏标准是以  $\sigma_p$  与  $\sigma_t$  共同作用为依据, 将疲劳方程分子的  $\sigma_{\max}$  只考虑  $\sigma_p$  显然不正确(虽然通过推导也得到了  $(f - \sigma_t)$  中的  $\sigma_t$ , 但与分子  $(\sigma_{\max} = \sigma_p + \sigma_t)$  本身的力学概念完全不同), 因此, 还是应该采用原始疲劳方程(式(6))推导极限状态方程(84 年规范就是按此力学原理推导的极限状态方程)。

修正的极限状态方程表达式及参数可以按以下几种方法确定。

#### 4.1.1 以同济大学疲劳方程为基础

1) 疲劳方程原形可以写成:

$$\lg \frac{\sigma_p + \sigma_t}{f} = \lg a' - b' \lg N_e \quad (9)$$

式中,  $b'$  包含应力比  $R$ , 即  $b' = c(1 - R)$ 。

通过式(9)得到极限状态方程:

$$\sigma_p + \sigma_t = \frac{f}{\frac{1}{a'} N_e^{b'}} \quad (10)$$

因为疲劳方程回归系数一般都是线性关系, 可以通过式(9)与式(7a)相比得到回归系数  $a'$  与  $b'$ , 假定  $a' = a = 1.0$ , 则:

$$b' = \frac{\lg \left( \frac{\sigma_p + \sigma_t}{a' f} \right)}{\lg \left( \frac{\sigma_p}{a(f - \sigma_t)} \right)} = \frac{\lg \left( \frac{\sigma_p + \sigma_t}{f} \right)}{\lg \left( \frac{\sigma_p}{f - \sigma_t} \right)} b \quad (11)$$

式(11)计算得到  $b'$  值, 式(10)变为:

$$\sigma_p + \sigma_t = \frac{f}{k_f}, k_f = N_e^{b'} \quad (12)$$

式(12)即是式(1)的基本表达式, 因此, 考虑可靠度的式(1)可以表达为下式形式:

$$\gamma_r (\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq \frac{f_r}{k_f} \quad (13)$$

$$(\sigma_{pr} = k_t k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}, k_f = N_e^{b'})$$

2) 直接通过式(6)推导极限状态方程, 得到下式形式:

$$\sigma_p + \sigma_t = \frac{f}{\frac{1}{a} N_e^{0.0422(1-R)}} = \frac{f}{\frac{1}{a} N_e^{0.0422(1-\frac{\sigma_t}{\sigma_p + \sigma_t})}} \quad (14)$$

假定  $a=1.0$ , 因此, 考虑可靠度的式(1)可以表达为下式形式:

$$\begin{aligned} \gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) &\leq \frac{f_r}{k_f}, \\ (\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}), \\ k_f &= N_e^{0.0422(1-R)} = N_e^{0.0422(1-\frac{\sigma_t}{\sigma_p + \sigma_t})} \end{aligned} \quad (15)$$

#### 4.1.2 以混凝土板破坏标准为基础

按力学理论及规范定义, 水泥混凝土路面板破坏标准是板的荷载疲劳应力与温度疲劳应力之和不超过水泥混凝土极限弯拉疲劳强度, 因此, 可以直接按此定义建立极限状态方程:

$$\sigma_p + \sigma_t \leq \frac{f}{k_f} \quad (16)$$

式中,  $k_f$  为疲劳修正系数。

因此, 考虑可靠度的式(1)可以表达为下式形式:

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq \frac{f_r}{k_f} \quad (17)$$

式中:  $\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}$ ;  $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ 。

$k_f$  具体数值可以通过混凝土疲劳试验进一步研究确定。

#### 4.1.3 以极限应力为基础

如果假定  $\sigma_t$  为极限应力, 通过式(7a)推导极限状态方程是符合力学理论的, 可以得到下式形式:

$$\frac{1}{a} N_e^b \sigma_p + \sigma_t = f \quad (18)$$

式中:  $\sigma_p$  为疲劳应力;  $\frac{1}{a} N_e^b \sigma_p$ 、 $\sigma_t$  及  $f$  为极限应力;  $\frac{1}{a} N_e^b$  为疲劳修正系数。

假定  $a=1.0$ , 因此, 以极限应力为基础考虑可靠度的式(1)可以表达为下式形式:

$$\begin{aligned} \gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) &\leq f_r, \\ (\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps}, \sigma_{tr} = \sigma_{tm}, k_f = N_e^b) \end{aligned} \quad (19)$$

式中,  $\sigma_{pr}$ 、 $\sigma_{tr} = \sigma_{tm}$  及  $f_r$  都是极限应力。

$\sigma_{tm}$  的规范定义是设计频率为 1/50 的最大温度疲劳应力, 而水泥混凝土路面使用年限一般为 20 年~40 年, 因此, 也可以采用设计频率为 1/30 的最

大温度疲劳应力  $\sigma'_{tm}$ , 因为  $\sigma_{tm}$  与最大温度梯度 ( $T_g$ ) 是线性关系, 可以采用线性比例修正得到设计频率为 1/30 的  $\sigma'_{tm}$  ( $\sigma'_{tm} = \frac{30}{50} \sigma_{tm}$ )。

综上所述, 修正的极限状态方程基本形式是相同的, 只是各项具体参数有所不同, 有些内容需要进一步的理论与试验研究。

## 4.2 修正公式与规范公式设计结果对比

结合规范算例, 采用几个修正公式进行设计, 设计结果与规范公式进行对比。

### 1) 算例设计资料及数据处理

$$\begin{aligned} N_e &= 9.885 \times 10^6, f_r = 5.0 \text{MPa}, E_c = 31 \text{GPa}, \\ h_c &= 22 \text{cm}, E_0 = 30 \text{MPa}, E_1 = 1300 \text{MPa}, \\ E_2 &= 600 \text{MPa}, h_1 = 18 \text{cm}, h_2 = 15 \text{cm}, \\ E_t &= 165 \text{MPa}, \sigma_{ps} = 1.259 \text{MPa}, k_r = 0.87, \\ k_f &= N_e^e = 2.504, k_c = 1.20, \sigma_{tm} = 2.13 \text{MPa}, \\ k_t &= 0.532, \sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm} = 1.13 \text{MPa}, \gamma_r = 1.13. \end{aligned}$$

### 2) 按规范设计公式设计结果

$$\begin{aligned} \sigma_{pr} &= k_r k_f k_c \sigma_{ps} = \\ &0.87 \times 2.504 \times 1.20 \times 1.259 = 3.29 \text{MPa}, \\ \gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) &= 1.13 \times (3.29 + 1.13) = \\ &4.99 \text{MPa} \leq f_r = 5.0 \text{MPa}. \end{aligned}$$

### 3) 按修正设计公式设计结果

用 4 种修正公式设计, 结果如表 6 所示。

通过对比可以看出, 不同设计公式对水泥混凝土路面设计结果有一定影响, 除了修正公式③需要确定  $k_f$  而没有设计结果外, 满足设计要求的水泥混凝土路面板厚分别是:

规范公式:  $h=22\text{cm}$

修正公式①:  $h=24\text{cm}$

修正公式②:  $h=20\text{cm}(R=0.30)$

$h=22\text{cm}(R=0.20)$

$h=24\text{cm}(R=0.10)$

修正公式④:  $h=24\text{cm}$ (设计频率 1/30)

$h=28\text{cm}$ (设计频率 1/50)

可见, 规范公式设计的板厚偏小, 相比之下, 修正公式设计的板厚平均增加 2cm 左右。

规范公式的板设计厚度偏小与国内水泥混凝土路面大多出现板断裂等破坏现象是否相关需要做进一步的研究与论证; 另一方面, 修正公式中的

表 6 规范公式与修正公式设计结果对比  
Table 6 Comparative design results between specification formula and correct formula

极限状态方程	$h/cm$	$\sigma_{pr}$	$\sigma_{tr}$	$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr})$	$f_t / k_f$ 或 $f_t$
规范公式: $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_t$ ( $\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps}$ , $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ , $k_f = N_e^b$ )	22	3.29	1.13	4.99(合格)	5.0
修正公式①: $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq \frac{f_t}{k_f}$ ( $\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}$ , $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ , $k_f = N_e^b$ )	22	1.31	1.13	2.76	2.71
	24	1.16	1.10	2.55(合格)	2.75
	18	1.74	1.06	3.16	3.09
修正公式②: $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq \frac{f_t}{k_f}$ ( $\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}$ , $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ , $k_f = N_e^{0.0422(1-R)} = N_e^{0.0422(1-\frac{\sigma_{tr}}{\sigma_{pr} + \sigma_{tr}})}$ )	20	1.50	1.13	2.97(合格)	2.89
	20	1.50	1.13	2.97	
	22	1.31	1.13	2.76(合格)	
	22	1.31	1.13	2.76	
	24	1.16	1.10	2.55(合格)	2.71
修正公式③: $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq \frac{f_t}{k_f}$ ( $\sigma_{pr} = k_r k_c \sigma_{ps}$ , $\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm}$ , $k_f = ?$ )				考虑更合理的影响因素(S, R 等), 通过疲劳试验重新确定 $k_f$	
修正公式④: $\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_t$ ( $\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps}$ , $\sigma_{tr} = \sigma_{tm}$ , $k_f = N_e^b$ )	设计频率 1/30	22	3.29	1.27	5.15
		24	2.90	1.24	4.68(合格)
	设计频率 1/50	26	2.58	2.06	5.24
		28	2.35	1.95	4.86(合格)

各项系数是否可以沿用现行规范的公式有待于做进一步的理论与试验研究。

### 5 结论

(1) 针对规范中的等效荷载力与最大(极限)温度力的不统一, 提出了合理的等效温度疲劳应力修正方法。

(2) 针对规范极限状态方程中的极限应力与疲劳应力的不统一, 提出了以疲劳应力或极限应力统一的力学设计概念。

(3) 提出了几个不同力学设计概念的修正极限状态方程, 通过与规范算例比较, 论证了修正极限状态方程的正确性。

(4) 根据设计对比结果, 现行规范公式设计的板厚偏小, 修正公式设计的板厚平均增加 2cm 左右, 提出了规范厚度偏小是混凝土板断裂的主要理论原因。

针对水泥混凝土路面设计的复杂性及疲劳试验的多方面影响因素(如应力水平  $S$  及应力比  $R$  的影响范围不断增大), 若想取得更合理的水泥混凝土疲劳方程, 尚需要做进一步的理论与试验研究。

#### 参考文献:

[1] 中交公路规划设计院. 公路水泥混凝土路面设计规范

(JTG-D40-2002)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
Highway Planning and Design Institute of the Ministry of Communications. Specifications of cement concrete pavement design for highway (JTG-D40-2002) [S]. Beijing: China Communication Press, 2002. (in Chinese)  
[2] 中交公路规划设计院. 公路水泥混凝土路面设计规范 (JTJ012-94)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.  
Highway Planning and Design Institute of the Ministry of Communications. Specifications of cement concrete pavement design for highway (JTJ012-94) [S]. Beijing: China Communication Press, 1994. (in Chinese)  
[3] 袁宏, 姚祖康. 考虑温度应力和荷载应力共同作用的混凝土路面结构设计方法[J]. 同济大学学报, 1986, 14(4): 479-490.  
Yuan Hong, Yao Zukang. Design procedure for concrete pavements considering combined fatigue damage of loading and warping stresses [J]. Journal of Tongji University, 1986, 14(4): 479-490. (in Chinese)  
[4] Galloway J W. Effect of moisture changes on flexural and fatigue strength of concrete [R]. TRRL Report No.864, 1979.  
[5] Galloway J W. Effect of age on flexural, fatigue and compressive strength of concrete [R]. TRRL Report No.865, 1979.  
[6] Galloway J W. Effect of rate of loading on flexural strength and fatigue performance of concrete [R]. TRRL Report No.LR547, 1973.  
[7] 谢国忠, 袁宏, 姚祖康. 水泥混凝土路面最大温度梯度值[J]. 华东公路, 1982, 19(6): 9-19.

- Xie Guozhong, Yuan Hong, Yao Zukang. Study on maximum temperature gradient of cement concrete pavement [J]. East China Highway, 1982, 19(6): 9—19. (In Chinese)
- [8] Tepfers, Ralejs. Fatigue strength of plain, ordinary and light weight concrete [J]. ACI Journal, Proceedings, May 1979, 76(5): 635—652.
- [9] Ballinger, Craig A. Cumulative fatigue damage characteristics of plain concrete [R]. Highway Research Record 370, 1971.
- [10] 谈至明, 姚祖康, 田波. 水泥混凝土路面的荷载应力分析[J]. 公路, 2002(8): 15—18.  
Tan Zhiming, Yao Zukang, Tian Bo. Analysis of loading stresses in cement concrete pavements [J]. Highway, 2002(8): 15—18. (in Chinese)
- [11] 石小平, 姚祖康, 李华, 等. 水泥混凝土的弯曲疲劳特性[J]. 土木工程学报, 1990, 23(3): 11—22.  
Shi Xiaoping, Yao Zukang, Li Hua, et al. Study on flexural fatigue behavior of cement concrete [J]. Journal of Civil Engineering, 1990, 23(3): 11—22. (in Chinese)
- [12] 谈至明, 姚祖康. 水泥混凝土路面疲劳温度应力的计算[J]. 中国公路学报, 1994, 7(1): 1—7.  
Tan Zhiming, Yao Zukang. The estimation of fatigue-thermal stress of concrete pavements [J]. China Journal of Highway and Transport, 1994, 7(1): 1—7. (in Chinese)
- [13] 谈至明, 姚祖康. 非线性温度场下的水泥混凝土路面温度应力[J]. 中国公路学报, 1993, 6(4): 9—17.  
Tan Zhiming, Yao Zukang. Thermal stress in cement concrete pavements with non-linear temperature regime [J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6(4): 9—17. (in Chinese)
- [14] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 水泥混凝土路面的温度应力分析[J]. 公路, 2002(8): 19—22.  
Tan Zhiming, Yao Zukang, Liu Boying. Analysis of thermal stresses in cement concrete pavements [J]. Highway, 2002(8): 19—22. (in Chinese)
- [15] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Deng Xuejun. Subgrade and pavement engineering [M]. Beijing: China Communication Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 中交公路规划设计院. 公路水泥混凝土路面设计规范(JTJ012-84)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1984.  
Highway Planning and Design Institute of the Ministry of Communications. Specifications of cement concrete pavement design for highway (JTJ012-84) [S]. Beijing: China Communication Press, 1984. (in Chinese)
- [17] 中国民用航空总局. 民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范(MHJ 5004-95)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.  
Civil Aviation Administration of China. Specifications of cement concrete pavement design for civil airport (MHJ 5004-95) [S]. Beijing: China Communication Press, 1995. (in Chinese)