

文章编号:1671-6833(2007)01-0087-04

## 不同温度积下半刚性材料抗压回弹模量研究

张 斌<sup>1,2</sup>, 申爱琴<sup>1</sup>, 李炜光<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 针对不同季节铺筑的半刚性材料使用性能差异大, 而设计指标——模量无法结合实际应用条件确定, 导致结构设计出现偏差的问题, 研究中对水泥砂砾、水泥粉煤灰砂砾、二灰砂砾在不同温度条件下的模量变化特性进行了研究。提出温度积概念并用于评价施工季节影响, 通过建立上述三类混合料的温度积与模量增长率关系式, 结合河北某地 10 年气候调查资料, 量化推荐了基于不同温度积下上述三种材料模量标准, 密切了室内测试结果与实际应用的关系, 研究成果及方法可供其它地区参考。

**关键词:** 无机结合料稳定砂砾; 温度积; 模量增长率

**中图分类号:** TU 414 **文献标识码:** A

### 0 引言

半刚性材料整体性能好、承载能力高、易于施工, 特别是二灰砂砾、水泥砂砾、水泥粉煤灰砂砾, 原材料蕴藏量丰富、成本低廉, 适合修筑高等级公路基层、底基层以及低造价公路<sup>[1]</sup>, 从上世纪 60 年代就广泛应用于我国公路工程建设当中, 但在应用中也存在一些问题, 如每种混合料往往推荐一个模量范围共设计参考, 由于模量测试周期长、试验量大, 设计部门往往根据推荐范围取中值, 但是不同季节修筑的结构层使用性能差异显著<sup>[1,2]</sup>, 而在规定的相同范围内的不同取值计算出路面结构差异显著, 如何结合地区实际以及施工条件确定模量是解决这一问题的关键, 而未见此类报道, 这也制约了此类材料推广应用。在国家实施西部开发战略以及大力建设农村公路的今天, 如何针对施工环境提出室内控制指标对推广此类材料已刻不容缓<sup>[1]</sup>。作者通过对二灰稳定、水泥稳定、水泥粉煤灰稳定砂砾的设计控制抗压回弹模量在不同温度条件下的变化特性的研究, 提出了 3 种材料的温度控制指标以及模量关系<sup>[1]</sup>, 结合某地区气候调查结果, 提出了不同季节施工时推荐使用的设计控制指标, 密切了室内测试结果与实际应用条件。

### 1 实验方案

#### 1.1 原材料

(1) 石灰选取了河北某地常用石灰, 水泥选

取了太行牌普通硅酸盐水泥, 粉煤灰选取了该地两个电厂的粉煤灰, 原材料技术标准详见表 1~表 3 所示。考虑到 A 电厂的粉煤灰比较细, 所以本研究选用 A 厂粉煤灰。

表 1 石灰技术指标表

| Tab. 1 Lime performance index table % |      |           |        |       |
|---------------------------------------|------|-----------|--------|-------|
| CaO                                   | MgO  | CaO + MgO | 筛余量/mm |       |
|                                       |      |           | 0.71   | 0.125 |
| 54.96                                 | 1.33 | 56.29     | 1.38   | 22.57 |

表 2 水泥技术指标表

| Tab. 2 Cement performance index table |      |     |      |        |      |
|---------------------------------------|------|-----|------|--------|------|
| 强度/MPa                                |      | 安定性 | 细度/% | 凝结时间/h |      |
| 3 d                                   | 28 d |     |      | 初凝     | 终凝   |
| 15.5                                  | 33.5 | 合格  | 5.4  | 2.54   | 4.30 |

表 3 粉煤灰技术指标表

| Tab. 3 Fly ash performance index table                                  |       |       |
|---|-------|-------|
| 技术指标  | A 电厂  | B 电厂  |
| 比表面积/( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )                              | 4 615 | 3 184 |
| 需水量比/%  | 95    | 91    |
| 烧失量/%   | 13.11 | 14.46 |
| $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量/% | 73.4  | 72.5  |
| $\text{SO}_3$ 含量/%  | 0.65  | 0.42  |

(2) 钢渣: 由于二灰砂砾需要掺配后使用, 而调查发现, 该区钢渣资源丰富, 价格低廉 (3~4 元/ $\text{m}^3$ ), 该区蕴藏量大的两种钢渣技术指标见表

收稿日期: 2006-09-11; 修订日期: 2006-12-14

作者简介: 张 斌(1978-), 男, 陕西宝鸡人, 长安大学博士生, 主要从事道路工程研究工作。

4. 由表 4 可见, B 钢铁厂钢渣视密度大、强度高, 无侧限抗压强度大, 磨损率小, 达到岩浆类 III 级石料标准, 满足基层力学强度要求, 压碎值小于 30%, 满足基层粒料使用要求, 因此从物理力学性能来看, 该钢铁厂的钢渣可用于基层的修筑。

1.2 试验方案

选取水泥砂砾、二灰砂砾、水泥粉煤灰砂砾进行室内测试及分析, 为了使实验结果具有代表性, 对二灰砂砾、水泥粉煤灰砂砾, 选用集料级配变化

大的配合比方案, 研究采用配合比方案有, L1 - 0、L3 - 0、L4 - 0、C1 - 1、C3 - 1、C4 - 0, 各方案集料级配见表 5、表 6 所示。

表 4 钢渣物理力学性能试验结果

Tab. 4 Test result of steel scrap mechanical property

| 材料  | 视密度/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) | 磨损率<br>/% | 压碎值<br>/% | 抗压强度<br>/MPa |
|-----|---------------------------------|-----------|-----------|--------------|
| A 厂 | 2.67                            | 21.45     | 25.5      | 59.0         |
| B 厂 | 2.94                            | 19.64     | 23.0      | 81.8         |

表 5 无机结合料稳定砂砾室内试验级配

Tab. 5 Inorganic binder grit gradation in lab test

| 代号  | 钢渣掺量/% | 筛孔尺寸/mm |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-----|--------|---------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|     |        | 37.5    | 31.5 | 19   | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.075 |
|     |        | 通过率/%   |      |      |      |      |      |      |      |       |
| G-1 | 35     | 100     | 91.1 | 68.0 | 51.5 | 43.0 | 39.7 | 33.2 | 26.6 | 4.6   |
| G-3 | 未掺配    | 100     | 93.2 | 80.4 | 71.2 | 65.3 | 61.1 | 51.1 | 40.9 | 7.0   |
| G-4 | 规范中值   | 100     | 92.5 | 75   | 60   | 45   | 35   | 26   | 18.5 | 7.5   |
|     | 规范上限   | 100     | 100  | 85   | 70   | 55   | 45   | 35   | 27   | 15    |
|     | 规范下限   | 100     | 85   | 65   | 50   | 35   | 25   | 17   | 10   | 0     |

表 6 不同无机结合料稳定砂砾配合比方案代号

Tab. 6 Different projects code name of Inorganic binder grit

| 代号     | 混合料配比(质量比)             | 级配<br>类型 | 水泥用<br>量/% |
|--------|------------------------|----------|------------|
| L1 - 0 | 8(石灰): 12(粉煤灰): 80(集料) | G - 1    | 0          |
| L3 - 0 | 8(石灰): 12(粉煤灰): 80(集料) | G - 3    | 0          |
| L4 - 0 | 8(石灰): 12(粉煤灰): 80(集料) | G - 4    | 0          |
| C1 - 1 | 5(水泥): 5(粉煤灰): 90(集料)  | G - 1    | 5          |
| C3 - 1 | 5(水泥): 5(粉煤灰): 90(集料)  | G - 3    | 5          |
| C4 - 0 | 5(水泥): 95(集料)          | G - 4    | 5          |

说明: “L”代表二灰类材料, 前一数字代表级配类型, 后一数字代表水泥掺量, 例如对于“L1 - 2”, 其中前一数字“1”代表集料级配采用 G - 1, 后一数字“2”代表外掺水泥掺量为 2%。“C”代表水泥类材料, 前一数字代表级配类型, 后一数字代表粉煤灰与水泥的比例, 例如对于“C1 - 2”, 其中前一数字“1”代表集料级配采用 G - 1, 后一数字“2”代表粉煤灰与水泥的比例为 2: 1。

2 不同温度积下抗压回弹模量试验

为评价温度对强度影响, 提出温度积概念, 即将  $T_a$  在 0 ~ 24 h 之间积分, 再将积分值按不同龄期累计。

$$wT_i = \int_0^{24} T_a dt, WT = \sum_{i=0}^T wT_i \quad (1)$$

式中:  $wT_i$  为  $T_a$  在时间(24 h)上的积分;  $T$  为试件

养生龄期;  $WT$  为不同养生龄期时得温度积,  $(h \cdot ^\circ C)$ 。

作者对试件采用标准养生(20℃)和不同季节自然养生, 自然养生试件, 自成型之日起, 每天记录当天的最高和最低气温, 计算出不同龄期的温度积  $(h \cdot ^\circ C)$ , 建立强度与温度积关系, 反映对无机结合料稳定砂砾力学性能的影响。当温度积为负数时, 考虑到强度、模量、劈裂强度等力学指标不可能随温度积的下降而递减, 此时负温度积以 0 计。

此外, 气温变化的周期性与非对称性可用三角函数的线性组合来拟合, 同济大学研究提出气温日变化规律, 表达式见式(2)<sup>[5]</sup>

$$T_a = \bar{T}_a + \tilde{T}_a \left[ (0.5 + \theta) \sin \frac{\pi t}{12} + (0.5 - \theta) \sin \left( \frac{\pi t}{4} - \pi \right) + (1 - 2\theta) \sin \left( \frac{\pi t}{6} - \frac{\pi}{2} \right) \right]$$
$$\bar{T}_a = \frac{1}{2} (T_a^{\max} + T_a^{\min}), \tilde{T}_a = \frac{1}{2} (T_a^{\max} - T_a^{\min}),$$
$$\theta = (\bar{T}_a - T_a^{\min}) / 2\tilde{T}_a \quad (2)$$

式中:  $T_a$  为辐射日气温,  $^\circ C$ ;  $\bar{T}_a$  为日平均气温,  $^\circ C$ ;  $\tilde{T}_a$  为日气温振幅,  $^\circ C$ ;  $T_a^{\max}$  为日最高气温,  $^\circ C$ ;  $T_a^{\min}$  为日最低气温,  $^\circ C$ ;  $t$  为时间变量, 规定早晨 6 点为 0。

不同养生条件下抗压回弹模量测试结果和相

应温度积见表 7,计算出不同温度积下抗压回弹模量的增长率<sup>[6]</sup>,结果见表 8.

表 7 不同温度积下抗压回弹模量试验结果

Tab. 7 Modulus test result in different temperature - integral

| 材料   | 二灰砂砾                 |                     |                      |                    | 水泥粉煤灰砂砾              |                     |                      |                     | 水泥砂砾                 |                     |                      |                     |
|------|----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|      | L1 - 0               |                     | L3 - 0               |                    | L4 - 0               |                     | C1 - 1               |                     | C3 - 1               |                     | C4 - 0               |                     |
| 龄期/d | 温度积<br>/(h · °C)     | 模量<br>/MPa          | 温度积<br>/(h · °C)     | 模量<br>/MPa         | 温度积<br>/(h · °C)     | 模量<br>/MPa          | 温度积<br>/(h · °C)     | 模量<br>/MPa          | 温度积<br>/(h · °C)     | 模量<br>/MPa          | 温度积<br>/(h · °C)     | 模量<br>/MPa          |
| 28   | 12960 <sup>(1)</sup> | 267 <sup>(1)</sup>  | 12960 <sup>(1)</sup> | 299 <sup>(1)</sup> | 12960 <sup>(1)</sup> | 357 <sup>(1)</sup>  | 12960 <sup>(1)</sup> | 593 <sup>(1)</sup>  | 12960 <sup>(1)</sup> | 462 <sup>(1)</sup>  | 12960 <sup>(1)</sup> | 752 <sup>(1)</sup>  |
|      | 17264 <sup>(2)</sup> | 384 <sup>(2)</sup>  | 17264 <sup>(2)</sup> | 325 <sup>(2)</sup> | 17264 <sup>(2)</sup> | 441 <sup>(2)</sup>  | 17264 <sup>(2)</sup> | 667 <sup>(2)</sup>  | 17264 <sup>(2)</sup> | 494 <sup>(2)</sup>  | 17264 <sup>(2)</sup> | 826 <sup>(2)</sup>  |
|      | 9637 <sup>(3)</sup>  | 189 <sup>(3)</sup>  | 9637 <sup>(3)</sup>  | 157 <sup>(3)</sup> | 9637 <sup>(3)</sup>  | 236 <sup>(3)</sup>  | 9637 <sup>(3)</sup>  | 538 <sup>(3)</sup>  | 9637 <sup>(3)</sup>  | 392 <sup>(3)</sup>  | 9637 <sup>(3)</sup>  | 646 <sup>(3)</sup>  |
| 90   | 42720 <sup>(1)</sup> | 657 <sup>(1)</sup>  | 42720 <sup>(1)</sup> | 624 <sup>(1)</sup> | 42720 <sup>(1)</sup> | 708 <sup>(1)</sup>  | 42720 <sup>(1)</sup> | 929 <sup>(1)</sup>  | 42720 <sup>(1)</sup> | 865 <sup>(1)</sup>  | 42720 <sup>(1)</sup> | 1198 <sup>(1)</sup> |
|      | 50585 <sup>(2)</sup> | 825 <sup>(2)</sup>  | 50585 <sup>(2)</sup> | 775 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 887 <sup>(2)</sup>  | 50585 <sup>(2)</sup> | 1004 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 926 <sup>(2)</sup>  | 50585 <sup>(2)</sup> | 1341 <sup>(2)</sup> |
|      | 21798 <sup>(3)</sup> | 544 <sup>(3)</sup>  | 21798 <sup>(3)</sup> | 496 <sup>(3)</sup> | 21798 <sup>(3)</sup> | 608 <sup>(3)</sup>  | 21798 <sup>(3)</sup> | 826 <sup>(3)</sup>  | 21798 <sup>(3)</sup> | 669 <sup>(3)</sup>  | 21798 <sup>(3)</sup> | 977 <sup>(3)</sup>  |
| 180  | 85920 <sup>(1)</sup> | 987 <sup>(1)</sup>  | 85920 <sup>(1)</sup> | 974 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 1012 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 1207 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 1143 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 1517 <sup>(1)</sup> |
|      | 68620 <sup>(2)</sup> | 1004 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 953 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 1096 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 1283 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 1216 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 1420 <sup>(2)</sup> |
|      | 33516 <sup>(3)</sup> | 771 <sup>(3)</sup>  | 33516 <sup>(3)</sup> | 719 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 854 <sup>(3)</sup>  | 33516 <sup>(3)</sup> | 1005 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 830 <sup>(3)</sup>  | 33516 <sup>(3)</sup> | 1167 <sup>(3)</sup> |

说明:(1)代表标准养生条件下的温度积(或回弹模量);(2)代表 7 月份成型试件的温度积(或回弹模量);(3)代表 9 月份成型试件的温度积(或回弹模量).

表 8 不同温度积与抗压回弹模量增长率关系

Tab. 8 The relation between different temperature - integral and modulus increase ratio

| 材料   | 二灰砂砾                 |                    |                      |                    | 水泥粉煤灰砂砾              |                    |                      |                    | 水泥砂砾                 |                    |                      |                    |
|------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
|      | L1 - 0               |                    | L3 - 0               |                    | L4 - 0               |                    | C1 - 1               |                    | C3 - 1               |                    | C4 - 0               |                    |
| 龄期/d | 温度积<br>/(h · °C)     | 增长<br>率            | 温度积<br>/(h · °C)     | 增长<br>率            | 温度积<br>/(h · °C)     | 增长<br>率            | 温度积<br>/(h · °C)     | 增长<br>率            | 温度积<br>/(h · °C)     | 增长<br>率            | 温度积<br>/(h · °C)     | 增长<br>率            |
| 28   | 12960 <sup>(1)</sup> | 185 <sup>(1)</sup> | 12960 <sup>(1)</sup> | 207 <sup>(1)</sup> | 12960 <sup>(1)</sup> | 247 <sup>(1)</sup> | 12960 <sup>(1)</sup> | 410 <sup>(1)</sup> | 12960 <sup>(1)</sup> | 319 <sup>(1)</sup> | 12960 <sup>(1)</sup> | 520 <sup>(1)</sup> |
|      | 17264 <sup>(2)</sup> | 265 <sup>(2)</sup> | 17264 <sup>(2)</sup> | 225 <sup>(2)</sup> | 17264 <sup>(2)</sup> | 284 <sup>(2)</sup> | 17264 <sup>(2)</sup> | 461 <sup>(2)</sup> | 17264 <sup>(2)</sup> | 341 <sup>(2)</sup> | 17264 <sup>(2)</sup> | 571 <sup>(2)</sup> |
|      | 9637 <sup>(3)</sup>  | 131 <sup>(3)</sup> | 9637 <sup>(3)</sup>  | 108 <sup>(3)</sup> | 9637 <sup>(3)</sup>  | 149 <sup>(3)</sup> | 9637 <sup>(3)</sup>  | 372 <sup>(3)</sup> | 9637 <sup>(3)</sup>  | 271 <sup>(3)</sup> | 9637 <sup>(3)</sup>  | 446 <sup>(3)</sup> |
| 90   | 42720 <sup>(1)</sup> | 303 <sup>(1)</sup> | 42720 <sup>(1)</sup> | 294 <sup>(1)</sup> | 42720 <sup>(1)</sup> | 337 <sup>(1)</sup> | 42720 <sup>(1)</sup> | 461 <sup>(1)</sup> | 42720 <sup>(1)</sup> | 415 <sup>(1)</sup> | 42720 <sup>(1)</sup> | 592 <sup>(1)</sup> |
|      | 50585 <sup>(2)</sup> | 388 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 359 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 416 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 502 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 445 <sup>(2)</sup> | 50585 <sup>(2)</sup> | 661 <sup>(2)</sup> |
|      | 21798 <sup>(3)</sup> | 246 <sup>(3)</sup> | 21798 <sup>(3)</sup> | 222 <sup>(3)</sup> | 21798 <sup>(3)</sup> | 275 <sup>(3)</sup> | 21798 <sup>(3)</sup> | 411 <sup>(3)</sup> | 21798 <sup>(3)</sup> | 327 <sup>(3)</sup> | 21798 <sup>(3)</sup> | 488 <sup>(3)</sup> |
| 180  | 85920 <sup>(1)</sup> | 398 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 389 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 415 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 512 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 389 <sup>(1)</sup> | 85920 <sup>(1)</sup> | 649 <sup>(1)</sup> |
|      | 68620 <sup>(2)</sup> | 434 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 410 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 471 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 548 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 410 <sup>(2)</sup> | 68620 <sup>(2)</sup> | 649 <sup>(2)</sup> |
|      | 33516 <sup>(3)</sup> | 344 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 321 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 379 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 436 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 357 <sup>(3)</sup> | 33516 <sup>(3)</sup> | 510 <sup>(3)</sup> |

说明:依次采用 0 ~ 28d、0 ~ 90d 和 0 ~ 180d 的抗压回弹模量增长率,龄期采用对数坐标,模量采用常数坐标.其中(1)代表标准养生条件下的温度积(或抗压回弹模量增长率);(2)代表 7 月份成型试件的温度积(或抗压回弹模量增长率);(3)代表 9 月份成型试件的温度积(或抗压回弹模量增长率).

3 试验结果分析

对表 8 中的温度积与抗压回弹模量增长率进行回归,结果见表 9.

现有研究成果表明<sup>[6]</sup>,对于二灰砂砾和水泥(粉煤灰)稳定砂砾,温度积与模量增长率线性关系良好.对二灰砂砾,将  $a_e$ 、 $b_e$  取均值后得到其温度积比值与抗压回弹模量增长率比值回归见式(3):

$$K_e = 124.68 \ln(WT) - 984.23 \quad (3)$$

表 9 不同温度积与回弹模量增长率的回归公式

Tab. 9 The regress formula between different temperature - integral and modulus increase ratio

| 材料类型及配合比 | $K_e = a_e \ln( WT) - b_e$ |        | $R^2$    |         |
|----------|----------------------------|--------|----------|---------|
|          | $a_e$                      | $b_e$  |          |         |
| 二灰砂砾     | L1 - 0                     | 127.84 | 1 022.00 | 0.922 1 |
|          | L3 - 0                     | 124.99 | 1 010.30 | 0.939 1 |
|          | L4 - 0                     | 121.20 | 920.39   | 0.903 9 |
| 水泥粉煤     | C1 - 1                     | 66.17  | 225.31   | 0.795 4 |
| 灰砂砾      | C3 - 1                     | 63.35  | 289.37   | 0.753 2 |
| 水泥砂砾     | C4 - 0                     | 88.11  | 343.35   | 0.728 1 |

同样的对于水泥砂砾和水泥粉煤灰砂砾的回归公式分别为  
水泥砂砾：

$$K_e = 88.11 \ln(WT) - 343.35 \quad (4)$$

水泥粉煤灰砂砾：

$$K_e = 64.76 \ln(WT) - 257.3 \quad (5)$$

根据不同养生条件下统计出的温度积，就可以推荐出这两类材料不同养生条件下各龄期的抗压回弹模量增长率及抗压回弹模量，计算结果见

表 10.

测试与分析结果表明，二灰砂砾模量受温度影响大，尤其是低温影响，由于该区 9~10 月季节施工时温度积差异显著，因此 180 d 模量差异达到了 30%，表明此类材料不适宜于在该季节施工。对水泥稳定砂砾，虽然 9~10 月温度积差异大，但是 90 d 模量值仅降低 10%，表明与二灰砂砾相比，此类材料模量受温度影响较小，水泥粉煤灰砂砾模量改变居中。

表 10 根据不同温度积推荐出的抗压回弹模量

Tab. 10 The recommendation modulus base on different temperature - integral

| 材料      | 试件养生方式     | 28 d   |       |     | 90 d   |       |       | 180 d  |       |       |
|---------|------------|--------|-------|-----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|         |            | WT     | $K_e$ | E   | WT     | $K_e$ | E     | WT     | $K_e$ | E     |
| 二灰砂砾    | 6~8 月自然养生  | 18 000 | 237   | 344 | 51 000 | 367   | 718   | 70 000 | 407   | 917   |
|         | 9~10 月自然养生 | 10 000 | 164   | 238 | 21 000 | 257   | 501   | 33 000 | 313   | 706   |
|         | 标养 20℃     | 12 960 | 196   | 284 | 42 720 | 345   | 675   | 85 920 | 432   | 975   |
| 水泥砂砾    | 6~8 月自然养生  | 18 000 | 520   | 752 | 51 000 | 612   | 1 195 | 70 000 | 640   | 1 443 |
|         | 9~10 月自然养生 | 10 000 | 468   | 678 | 21 000 | 534   | 1 043 | 33 000 | 573   | 1 293 |
|         | 标养 20℃     | 12 960 | 491   | 711 | 42 720 | 596   | 1 165 | 85 920 | 658   | 1 483 |
| 水泥粉煤灰砂砾 | 6~8 月自然养生  | 18 000 | 377   | 546 | 51 000 | 445   | 869   | 70 000 | 465   | 1 049 |
|         | 9~10 月自然养生 | 10 000 | 339   | 491 | 21 000 | 387   | 757   | 33 000 | 416   | 939   |
|         | 标养 20℃     | 12 960 | 356   | 515 | 42 720 | 433   | 846   | 85 920 | 478   | 1 079 |

说明：WT 为温度积，h·℃； $K_e$  为抗压回弹模量增长率；E 为抗压回弹模量 MPa。

#### 4 结论

(1) 针对室内测试结果与在实际应用时的差别，首次提出温度积指标并用于反映不同施工季节的差异；

(2) 建立了 3 种不同稳定砂砾的温度积与抗压回弹模量增长率关系，使用该关系式，在不同地区使用时，可根据混合料类型、待测地区施工季节历年温度变化情况量化确定不同类型稳定砂砾的模量值；

(3) 通过对比测试结果，可以发现，二灰稳定砂砾不适合在该区的 9~10 月施工，否则会显著降低基层承载能力，与之相比，水泥砂砾较佳，水泥粉煤灰居中；

(4) 研究成果及研究方法为其它地区解决此类问题提供了参考，但对于稳定砂砾类基层材料，在不同温度积下的其他路用性能有待于进一步研究。

#### 参考文献：

- [1] 申爱琴,李炜光,张玉斌.二灰砂砾基层综合路用性能及配比设计[R].西安:长安大学,2004:134-138.
- [2] 李炜光.沥青路面半刚性基层抗裂性能研究[D].西安:西安公路学院,2002.
- [3] 郑南翔.半刚性基层材料抗裂性能研究[D].西安:西安公路学院,1988.
- [4] 沙爱民.半刚性路面材料结构与性能[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [5] 吴赣昌.半刚性路面温度应力分析[M].北京:科学出版社,1995.
- [6] 申爱琴,李炜光,张 斌.邯郸地区天然砂砾应用研究[R].西安:长安大学,2005:119-132.
- [7] JTJ058-2000,公路工程集料试验规程[S].
- [8] JTJ034-2000,公路路面基层施工技术规范[S].
- [9] JTJ057-94,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

(下转第 93 页)

### 3 结语

(1)通过尺寸优化和形状优化的比较可以看出,以网壳的曲率半径、厚度和结点个数为变量的形状优化比传统的截面尺寸优化效果更为显著。

(2)以 ANSYS 为基础,以 ISIGHT 为优化平台,尝试把 ISIGHT 应用于建筑领域,结果证实是完全可行的、有效的。

(3)作者仅对网壳结构进行单目标形状优化,而优化设计是一项非常复杂的工程,其它复杂优化设计的层次逐渐由低至高,由结构的尺寸优化、形状优化、拓扑优化继后发展到最高层次的布局优化,优化的目标也逐渐从单目标扩展为多目标,优化模型亦将逐渐多样化和复杂化,这对设计提出了更高的要求。

### 参考文献:

- [1] 沈祖炎,陈扬骥.网架与网壳[M].上海:同济大学出版社,1997.169-197.
- [2] 尹德钰,刘善维,钱若军.网壳结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.243-417.
- [3] 尚晓江,邱峰. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.353-369.
- [4] 刘宗法.单层球面网壳的优化设计[J].重庆建筑大学学报,2005,27(1):67-70.
- [5] 马静敏.基于 ISIGHT 的油船槽形横舱壁优化设计[J].航海工程,2005,(1):35-37.
- [6] 李静斌.静力弹塑性分析在大跨度钢结构设计中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2005,26(4):15-19.

## Optimization Design of Double-layer of Kiewitt Reticulated Shell

LIU Hai-jun, SUN Shang, XU Bi-Juan

(School of Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Shelly radius, thickness, symmetrical sector numbers, layer numbers and the area of steel tube are regarded as design variants, and the overall cost of roles and nodes are regarded as objective function. The result of optimization indicates that the cost is reduced by 22.36 percent. The result shows more remarkable optimization effect than just optimizing the cross-section size, of which the overall cost is reduced by 8.50%.

**Key words:** reticulated shell; construction; optimization design

(上转第90页)

## Semi-rigid Materials Modulus Research in Different Temperature - integral

ZHANG bin<sup>1,2</sup>, SHEN Ai-qin<sup>1</sup>, LI Wei-guang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. The First Highway & Design Institute of China, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** For Semi-rigid materials paved in different seasons has notability performance on road using ability, the modulus of cement gravel, cement and fly ash gravel, lime and fly ash gravel are measured, but the design criterion-modulus can not be confirmed related the practical environment, so the problem on road construction design come forth. put forward the Temperature-integral to judge the influence of season to the performance of Semi-rigid material, by the connection of the Ratio of Temperature-integral with modulus-increase Ratio of three mixture mention before, by the climate surveying of 10 years in HeBei province, commend the modulus criterion of three mixture based on Temperature-integral, connection the practical using and test result in lab, the research result and methods can offer reference to other regions.

**Key words:** inorganic binder gravel; temperature-integral; modulus increase ratio