

混凝土公路设计中的热膨胀系数

Coefficient of Thermal Expansion in Concrete Pavement Design



摘要：本文编译自美国交通部联邦公路管理局的技术简报，该技术简报描述了混凝土的热膨胀系数（CTE），其在混凝土路面行为中的作用，以及如何确定混凝土路面设计和分析目的的建议。讨论了“力学-经验路面设计指南”中混凝土路面性能预测模型的敏感性。描述了用于确定或估算 CTE 的实验室测试和其他方法，并总结了来自“长期路面性能”对路面部分的岩心所进行 CTE 的实验室测试结果，提供实用的指导路线来确定或估算 CTE，并在设计和建造混凝土路面时考虑 CTE 对混凝土板对温度变化响应的影响。

关键词：热膨胀系数,混凝土测试,混凝土公路设计,力学-经验路面设计指南

1. 引言

混凝土在温度升高时膨胀，在温度降低时收缩。衡量温度变化对混凝土体积变化的影响称为混凝土的热膨胀系数（CTE），定义为温度变化一度时单位长度变化量。混凝土路面混合物的 CTE 取决于骨料（aggregate）类型和饱和度。

由于粗骨料占混凝土体积的大部分，因此对混凝土 CTE 影响最大的因素是粗骨料的 CTE。混凝土路面施工中常用的粗骨料类型中石英的 CTE 最高，其他常用粗骨料类型的 CTE 在很大程度上取决于其石英含量。根据所用骨料类型，混凝土 CTE 的典型值如表 8-1 所示。

粗骨料对 CTE 值的影响最大，但细骨料也是一个影响因素。天然砂通常含有高二氧化硅（高 CTE），而制造的碎石灰石细骨料的 CTE 则较低。

水泥浆的 CTE 对水分含量非常敏感，但由于粗骨料的影响减弱使得混凝土的 CTE 较低（Powers 和 Brownyard，1947；Yeon 等人，2009）。混凝土的 CTE 在相对湿度约 70% 时最高，当混凝土完全饱和时 CTE 会降低 20~25%（美国陆军 COE 1981）。

表 8-1 混凝土骨料类型的热膨胀系数 (CTE) (LTPP 标准日期版本 25.0)

主要骨料种类	平均 CTE ($^{\circ}F \times 10^{-6}$)	标准偏差 (s) ($^{\circ}F \times 10^{-6}$)	平均 CTE ($^{\circ}C \times 10^{-6}$)	标准偏差 (s) ($^{\circ}C \times 10^{-6}$)	样品数 ¹
Andesite	4.32	0.42	7.78	0.75	52
Basalt	4.33	0.43	7.80	0.77	141
Chert	6.01	0.42	10.83	0.75	106
Diabase	4.64	0.52	8.35	0.94	91
Dolomite	4.95	0.40	8.92	0.73	433
Gabbro	4.44	0.42	8.00	0.75	8
Gniess	4.87	0.08	8.77	0.15	3
Granite	4.72	0.40	8.50	0.71	311
Limestone	4.34	0.52	7.80	0.94	813
Quartzite	5.19	0.50	9.34	0.90	131
Rhyolite	3.84	0.82	6.91	1.47	7
Sandstone	5.32	0.52	9.58	0.94	84
Schist	4.43	0.39	7.98	0.70	30
Siltstone	5.02	0.31	9.03	0.56	21
				总样品数	2251

1. 在 LTPP 标准数据 25.0 版本 (2011 年 1 月) 中共提供了 2991 个 CTE 数据, 由于骨料类型没有定义或主要骨料类型只提供了一个样品, 其中 628 个数据无法使用, 另外 11 个 CTE 异常数据并未包含在此数据表中。

2. CTE 如何影响混凝土路面行为变化

混凝土响应温度变化时在体积上的改变是混凝土路面多种行为的起因, 混凝土路面中每天和季节性温度循环变化导致衔接和裂缝的循环打开和关闭。为了使横向开裂最小化, 使用具有高 CTE 的混凝土构造的连接路面可能需要比具有较低 CTE 的混凝土路面更短的接缝间距, 这将增加初始建造的成本。

在白天, 当混凝土路面的顶部比路面的底部更热时, 混凝土将在路面的顶部膨胀而不是在底部。如果不限这种不同的变形 (通过横向接头处的销钉、纵向接头处的连杆或两者, 以及路面自身的重量), 则路面将向下卷曲。另一方面, 如果沿着路面边缘限制路面的白天向下卷曲, 结果将造成混凝土和销钉之间的支撑应力更高。

同样，在夜间，当混凝土路面顶部冷比路面底部更冷时，混凝土将在路面顶部收缩而不是在底部收缩。如果这种差异变形不受限制（通过横向接头处的销钉，纵向接头处的连杆或两者），则路面将向上卷曲。另一方面，如果沿着路面边缘限制路面的夜间向上卷曲，则结果将是混凝土和销钉之间的支撑应力更高。

如果路面下方的基层足够柔软，则路面可以向上或向下卷曲，并且仍然与路面中间的基层和沿其边缘保持完全接触，如果路面平坦且与基层完全接触，则由交通车辆载荷引起的应力将不会差别很大。然而，如果路面下方的基层足够坚硬，且当路面响应深度方向温度梯度而向上或向下卷曲时，一部分路面会卷曲而不与基层接触，由交通车辆载荷对路面引起的应力将大于路面平坦且与基层完全接触时的情况。这种向上卷曲在夜间尤其是一个问题，当路面边缘和拐角处的支撑减少将导致交通车辆荷载下边缘和拐角处的应力增加。

混凝土的 CTE 对连续钢筋混凝土路面（CRCP）的性能也有影响。CRCP 中的钢含量设计为可以达到相当均匀的裂缝间距，并且是在约 1~2 米范围内。裂缝间距太短可能会增加冲孔的可能性，裂缝间隔过长可能会增加钢材断裂的可能性。如果混凝土的 CTE 高于钢设计中的假定（或隐含值），则可能无法实现所希望的裂缝间距和均匀性。因此，在设计阶段确定混凝土 CTE（基于过去的经验或新测试）、调整设计以达到所需的性能水平并要求在施工期间验证 CTE 值就变得非常重要。

3. 热膨胀系数测试方法

确定混凝土 CTE 的 AASHTO 测试方法是 T 336-11。该实验室测试包括测量直径为 10 mm 的饱和混凝土芯材或圆柱体的长度变化，同时温度从 10°C 升至 50°C 然后将温度降低到 10°C。混凝土样品和测量装置完全浸泡在水浴中以便在测试期间保持混凝土的饱和度，虽然 100% 饱和度混凝土的 CTE 不如水分含量稍低时 CTE，但实验室测试是在饱和样品上进行以便控制水分含量。来自两家供应商的 CTE 测试设备和安装在 CTE 测试设备中的混凝土样品如图 8-1 所示。



图 8-1 在 FHWA 混凝土实验室使用的测试设备测量混凝土的 CTE

在进行膨胀（加热）和收缩（冷却）段期间的测量时，需要对测量进行调整以考虑温度变化对测试设备本身的影响，通过计算两个测试段中每度温度变化的样品长度变化，并除以样品长度得到混凝土的 CTE。必要时重复测试过程，直到在膨胀段和收缩段测试的 CTE 值相差在每度每百万分之 0.3 之内。然后将混凝土的 CTE 计算值确定为获得的两个连续 CTE 值的平均值，一个来自测试的膨胀段，一个来自测试的收缩段。

美国陆军工程兵团有一个类似的测试方法来确定混凝土的 CTE(美国陆军 COE 1981)，该测试方法 CRD-C 39-81 指出测试在 5~60°C 的温度范围内进行。工程兵团测试方法指出，当混凝土试样的长度变化仅在两个温度点之间进行测量时，应报告单个 CTE 值，但是当在一系列不同温度下进行长度变化测量时，应给出 CTE 与温度的关系曲线，并应说明不同温度区间的 CTE 计算值。

4. 力学-经验公路设计指南推荐的测定热膨胀系数

对于 1 级设计：此级别需要输入最高精度且被认为适用于最重要项目。力学-经验路面设计指南（MEPDG）建议对混凝土样品进行实验室测试以确定 CTE（AASHTO 2008）。

许多国家已开始使用其典型骨料来描述其典型的普通水泥混凝土混合物，并将这些 CTE 值存储在数据库中。他们将根据项目位置将这些值用作 CTE 输入。通过定义，这些值不是 1 级输入，但它们是比 2 级或 3 级输入更真实的输入。

对于 2 级设计：此级别被认为适用于常规、实际项目。MEPDG 建议将混凝土 CTE 估算为骨料和水泥浆的 CTE 值的平均值，相对于它们在混合物中的体积比例。

对于 3 级设计：此级别是需要输入精度最低的级别。MEPDG 允许使用典型的 CTE 值。要使用的值应该是要在项目中使用的骨料类型制作的混凝土的典型值。表 8-1 提供了从“长期路面性能 (LTPP)”项目中实验室对芯材测试获得的混凝土 CTE 范围，应该注意的是，这些值是基于来自美国和加拿大的骨料。根据矿物的不同，这些 CTE 值可能在不同地区有显著差异。

MEPDG(ARA-ERES 2004)基于未校正的 LTPP CTE 数据和其他来源(Mindess 和 Young 1981; Kosmatka 等 2002; Jahangirnejad 等 2008)还提供了不同类型骨料典型混凝土 CTE 信息。

5. CTE 如何影响 MEPDG 的性能预测

MEPDG 将 CTE 确定为混凝土材料关键响应计算所需的输入参数之一，混凝土的 CTE 值对路面开裂的预测具有显著影响，并且在较小程度上对 MEPDG 的连接断裂具有影响 (Malella 等人，2005)。这两种危害都在 MEPDG 对路面不平整度预测中起着作用，较高的 CTE 值对应于更大的路面开裂预测量、更大的连接断裂和更大的路面不平整度。

6. CTE 测试和 MEPDG 危害模型

JCP 新的力学-经验路面设计指南 (MEPDG) 模型是使用 LTPP 数据库开发的，使用的 LTPP 数据参数之一是混凝土 CTE。由于发现用于原始混凝土路面危害模型开发的混凝土 CTE 数据是错误的 (Crawford 等人 2010)，当时使用的是 AASHTO TP 60-00 (AASHTO 2005) 测试方法，使用此方法导致 CTE 测量值偏高。对于用于校准 CTE 测试框架的 304 不锈钢校准样品，TP 60 试验方法推荐值为 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，但根据 ASTM E 228 测定的 304 不锈钢试样的 CTE 为 $15.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，使用这些错误的 CTE 数据对于混凝土而言造成实际使用的混凝土 CTE 相同比例的偏低。

用于校准 CTE 测试框架的不锈钢校准样品 CTE 测试方法已在新的 AASHTO T

336 标准方法 (AASHTO 2011 ; Tanesi 等人 2010) 中得到颁布 , 使用新的测试方法测定的 CTE 值低于使用 TP 60-00 测试方法测定的 CTE 值。LTPP 标准数据版本 24.0 及更高版本中的 CTE 值已经过校正 , 以符合 T 336 测试方法 , 并且是表 8-1 中报告的方法。

截至 2011 年 8 月 , 混凝土路面危害模型已纳入最近发布的 (2011 年 7 月) DARWin-ME™软件 (包含 MEPDG 版本 1.1 危害模型) , 此版本软件是基于使用 TP 60-00 测试方法确定的 CTE 值。因此 , 建议 Darwin ME 用户使用未经修正的 CTE 值 , 如 AASHTO 于 2008 年出版的 “力学-经验路面设计指南 : 实践手册” (临时版) 表 11-5 中所列数据 或使用根据 TP 60-00 测试方法确定的 CTE 数据。如果使用 T 336 标准确定可用的 CTE 数据 , 则应调整 CTE 值以与 DARWin-ME 一起使用 , 方法是将校准棒假定的 CTE ($17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) 与 ASTM E 228 测量 304 不锈钢校准样品的 CTE 值之间的差值相加 , 差值约为 $1.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

7. 推荐

MEPDG 提供了量化混凝土 CTE 对 JCP 和 CRCP 预测性能影响的机会 , MEPDG 对 JCP 路面裂缝的预测对所输入的 CTE 敏感 , 在较小程度上 , MEPDG 对连接断裂的预测也是如此。这两种危害都在 MEPDG 对路面不平整度的预测中起着作用。

鉴于 MEPDG 的几个混凝土路面危害模型对混凝土 CTE 输入的敏感性 , 对于 1 级设计 , 应通过对具有相同骨料类型和混合设计以及应用在路面结构中的圆柱体样品进行测试来确定 CTE (使用 AASHTO T 336-11 测试方法) 。

对于 3 级设计 , 应使用表 8-1 中提供的数据。这些数据是对 LTPP 混凝土路面的数百个芯材进行实验室测试后获得的平均 CTE 值 , 也是几个来源报告中的混凝土 CTE 的典型中间值。

如上所述 , 重要的是如果使用 DARWin-ME™软件 (包含 MEPDG 1.1 版危害模型) , 如果使用 AASHTO T 336 方法确定这些值 , 则应对 CTE 值进行调整 , 否则直接使用表 8-1 中的 CTE 值。

8. 参考文献

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), “Standard Method of Test for Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete,” T 336-11, Washington, DC, 2011.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice, Interim Edition, Washington, DC, 2008, p. 120.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), “Standard Method of Test for Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete,” TP 60-00, Washington, DC, 2005.

ARA-ERES, Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP Project 1-37a, Final Report, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC, 2004.

Crawford, G., J. Gudimettla, and J. Tanesi, “Inter-laboratory Study on Measuring Coefficient of Thermal Expansion of Concrete,” presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, January 2010.

Jahangirnejad, S., N. Buch, and A. Kravchenko, “A Laboratory Investigation of the Effects of Aggregate Geology and Sample Age on the Coefficient of Thermal Expansion of Portland Cement Concrete,” presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January 2008.

Kosmatka, S. H., B. Kerkhoff, and W. C. Panerese, Design and Control of Concrete Mixtures, Engineering Bulletin EB001, 14th ed., Portland Cement Association, Skokie, IL, 2002.

Malella, J., A. Abbas, T. Harman, C. Rao, R. Liu, and M. I. Darter, “Measurement and Significance of the Coefficient of Thermal Expansion of Concrete in Rigid Pavement Design,” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1919, 2005, pp. 38–46.

Mindess, S., and J. F. Young, Concrete, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981.

Powers, T. C., and T. L. Brownyard, “Studies of the Physical Properties of Hardened Cement Paste,” Proceedings of the American Concrete Institute, Vol. 43, 1947, p. 988.

Tanesi, J., G. L. Crawford, M. Nicolaescu, R. Meininger, and J. M. Gudimettla et al., “New AASHTO T336-09 Coefficient of Thermal Expansion Test Method: How Will It Affect You?” in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2164, pp. 52–57, 2010.

U.S. Army Corps of Engineers, “Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Concrete,” CRD-C 39-81, issued 1 June 1981.

Yeon, J. H., S. Choi, and M. C. Won. “Effect of Relative Humidity on Coefficient of Thermal Expansion of Hardened Cement Paste and Concrete,” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2113, 2009, pp. 83–91.