

固化土路面基层材料的双模量特性及数值分析

顾跃¹, 董圆庆², 孙本科³, 王金昌⁴

¹浙江海港嘉兴港务有限公司, 浙江 嘉兴

²沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳

³浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州

⁴浙江大学交通工程研究所, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年3月12日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

为探究固化土路面基层材料在复杂应力状态下的力学响应, 开展了室内小梁三点弯曲试验, 并基于双模量理论建立了有限元数值计算模型。研究对比了传统单模量模型与考虑拉压异性的双模量模型在弯拉工况下的计算差异。结果表明: 固化土材料具有显著的拉压模量差异特性; 传统单模量模型计算的跨中挠度与实测值偏差较大, 无法真实反映结构的变形行为; 引入双模量本构关系后, 有限元模拟结果与试验曲线吻合度显著提高。研究成果揭示了忽略拉压模量差异是导致传统设计偏不安全的重要原因, 可为固化土路面基层的抗裂设计与寿命预估提供更精确的理论依据。

关键词

道路工程, 固化土, 双模量, 有限元模拟, 三点弯曲试验

Bimodal Characteristics and Numerical Analysis of Solidified Soil Pavement Base Materials

Yue Gu¹, Yuanqing Dong², Benke Sun³, Jinchang Wang⁴

¹Zhejiang Seaport Jiaying Port Affairs Co., Ltd., Jiaying Zhejiang

²School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning

³Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

⁴Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

Received: March 12, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

To investigate the mechanical response of solidified soil pavement base materials under complex stress states, indoor three-point bending tests on small beams were conducted, and a finite element numerical calculation model was established based on the dual-modulus theory. The study compared the calculation differences between the traditional single-modulus model and the dual-modulus model considering tension-compression anisotropy under bending-tension conditions. The results show that solidified soil materials exhibit significant differences in tension and compression moduli; the mid-span deflection calculated by the traditional single-modulus model deviates significantly from the measured value, failing to accurately reflect the deformation behavior of the structure. After introducing the dual-modulus constitutive relation, the finite element simulation results showed a significant improvement in agreement with the experimental curves. The research findings reveal that neglecting the difference in tension and compression moduli is a significant reason for the unsafety of traditional designs, and can provide a more accurate theoretical basis for the crack-resistant design and life prediction of solidified soil pavement base materials.

Keywords

Road Engineering, Solidified Soil, Bimodulus, Finite Element Simulation, Three-Point Bending Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

半刚性基层沥青路面承载能力强、耐久性好,在我国应用最为广泛。固化土逐渐成为上述路面结构中使用较多的底基层材料,它是一种通过化学固化剂与土体成分反应形成的复合材料,具有造价低、强度高、施工便捷等优点。目前,关于固化土的研究多集中在固化剂配方优化、无侧限抗压强度及耐久性方面。然而,传统路面结构设计往往假设材料为各向同性的线弹性体,且拉压模量相等。实际上,固化土本质上属于准脆性材料,其抗拉强度远低于抗压强度,表现出显著的拉压异性力学特征。

许多研究表明,大多数材料在拉伸和压缩时表现出不同的弹性模量。对固化土材料来说,在受到压应力时,固化土材料表现出较强的抗压变形能力;而在受到拉应力时,其抗变形能力相对较弱。已有研究表明,固化土等无机结合料类材料在压应力作用下的模量(压模量)普遍高于在拉应力作用下的模量(拉模量)。在实际工程应用中,固化土材料常常处于复杂的拉-压同步应力状态下,特别是在路面结构中。因此,仅用压模量对路面结构计算分析是不准确的,为了准确评估固化土材料在复杂应力条件下的力学性能,进一步探讨其在拉-压双应力作用下的模量特征具有重要意义。

针对材料拉压模量不等的现象,学术界已有深入探讨。1982年, Ambartsumyan [1]最早建立了双模量弹性理论,指出对于拉压性质不同的材料,应分别采用不同的本构关系进行描述。在道路工程领域, Lytton [2]基于 SHRP 计划的研究指出,路面材料劲度模量的拉压差异性是导致路面疲劳开裂预测不准的关键因素。针对半刚性基层材料(如水泥稳定碎石、固化土等),国内外学者已证实其普遍存在拉压异性。现有研究证实了半刚性材料普遍存在拉压模量差异。究其原因,正如沙爱民等[3]所述,半刚性材料内部存在复杂的微裂纹和界面过渡区。在受压状态下,微裂纹闭合,材料表现出较高的刚度;而在受拉状态下,裂纹扩展导致有效承载面积减小,表现为模量的衰减。这种基于材料结构特征的损伤机理,正是导致固

化土拉压模量比大于 1 的根本原因。Lv 等[4]的研究表明,水泥稳定材料的抗压回弹模量通常大于抗拉回弹模量,且随着疲劳损伤的累积,两者的衰减规律并不同步;忽略这一差异可能导致对结构承载力的误判。潘勤学等[5]-[9]在其最新的研究中进一步统计发现,各类水泥基材料的压拉模量比主要分布在 1.2~2.0 之间,部分材料在破坏阶段甚至更高。潘勤学指出,若忽略拉压模量差异,会导致路面结构中性层位置偏移,理论计算结果与实际受力状态的偏差可达 20%~50%。因此,仅基于单一模量进行路面结构设计会导致参数取值的不唯一性,无法真实反映路面结构的力学响应。程怀磊等[10]针对沥青混合料的研究也进一步证实,材料在全频域内的动态压缩模量均显著大于拉伸模量,压拉模量比介于 1.6~4.0 之间。该研究明确指出,现行规范中基于单模量体系的计算方法,虽然能较好地拟合弯沉指标,但会显著低估路面结构内部的最大剪应力和拉应变。这意味着,忽略材料的拉压模量差异将导致设计参数取值偏于不安全,无法准确预估路面的早期疲劳开裂风险。

在数值模拟方面,双模量理论的应用一直受限于计算的收敛性难题。由于材料模量在拉压转换界面存在突变,直接在有限元软件(如 ABAQUS、COMSOL)中应用往往导致数值震荡。为了解决这一问题,Dong [11]提出了一种基于主应力方向判定和光滑转换函数的迭代算法。该方法通过在拉压过渡区引入连续的切线模量,有效解决了刚度矩阵奇异性问题,使得双模量本构模型在复杂边值问题中的精确求解成为可能。综上所述,本文建立了双模量三点弯曲梁有限元计算方法,通过相同条件下的三点弯曲梁试验对模型进行了验证,对于揭示固化土的抗裂机理具有重要意义。

2. 材料、试验与数值模拟方法

2.1. 试验材料与制备

2.1.1. 试验材料

试验土壤取自中国苏台高速桐乡段施工现场,取土深度为 2 m 以下,为粉质砂土,风干后过 4.75 mm 筛,其级配曲线见图 1。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对土样的天然含水率、液塑限、比重等基本物理指标进行测试,测试结果见表 1。

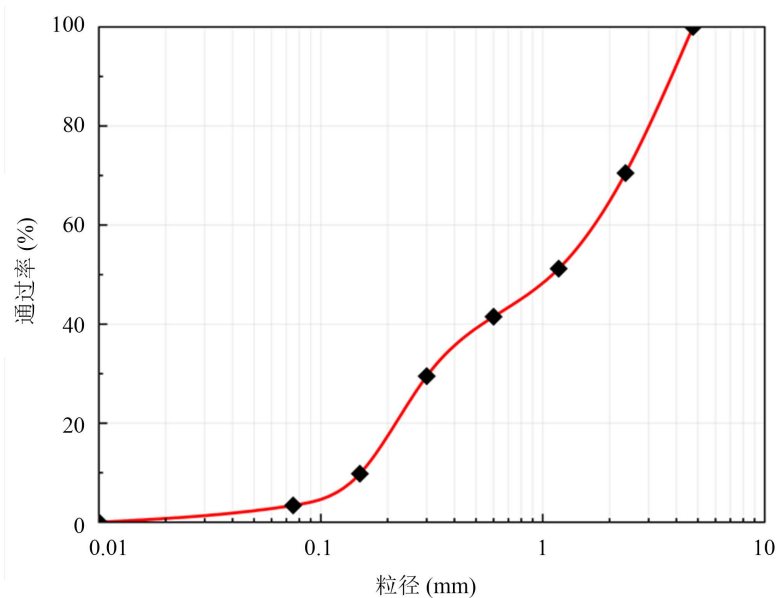


Figure 1. Soil gradation curve

图 1. 土样级配曲线

Table 1. Basic physical and mechanical properties of the soil used in the experiment**表 1.** 试验用土基本物理力学指标

天然含水率 %	液限 %	塑限 %	塑性 指数	最佳含水率 %	最大干密度 g/cm ³	比重
34	31.71	20.95	10.76	16.7	1.69	2.51

为增强研究的可复现性,本试验采用的具体配合比(按干土质量计)为:水泥 5%、消石灰 2%、复合固化剂 RC 0.02%、水玻璃 1.5%、碳酸钠 0.5%。上述配合比下测得的压拉模量比为 1.76,这一数值处于潘勤学等[5]-[9]统计的常规水泥基材料(1.2~2.0)及程怀磊等[10]测得的沥青混合料(1.6~4.0)范围之内,说明固化土作为一种半刚性材料,其拉压异性程度介于水泥稳定类材料与高分子混合料之间。需指出的是,当前研究主要针对粉质砂土类固化材料,结论具有一定的材料局限性。未来研究应进一步扩展至高液限粘土及不同掺量下的固化体系,以建立更具普适性的固化土双模量演化模型。

2.1.2. 试件制备与养护

试件成型工艺参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)执行。基于正交试验设计确定的最优配合比,定量称取土样、胶凝材料(水泥、石灰)及功能型外加剂(RC、水玻璃、碳酸钠)。通过“干拌-湿拌”双重工艺制备混合料,并控制加水量至最佳含水率状态。试件采用静压成型工艺,压实度控制标准为 95%。脱模后的试件立即套入密封袋进行保湿处理,并置于标准养护箱内进行标准养护(20℃ ± 2℃, RH ≥ 95%)。针对弯拉性能测试,加工制作几何尺寸为 50 mm × 50 mm × 200 mm 的标准小梁试件。

2.2. 室内试验方案

2.2.1. 模量参数获取试验

由于实验室条件限制,没有适配拉伸夹具尺寸的哑铃形试件模具,本试验将圆柱形试件修整成为哑铃形拉伸试件。由于拉伸模量试验规范中未给出加载速率,参照压缩试验,控制轴向应变速率为 1 mm/min。相关加载装置及试件见图 2,得到荷载-位移曲线见图 3。



Figure 2. Loading device and specimen for uniaxial tensile test of solidified soil
图 2. 固化土单轴拉伸试验加载装置及试件

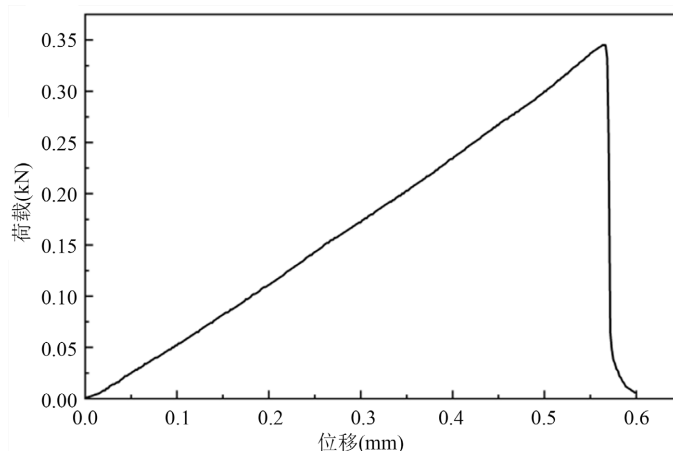


Figure 3. Typical curves of uniaxial tensile load-displacement in solidified soil
图 3. 固化土单轴拉伸荷载 - 位移典型曲线

为了确保非标准哑铃形试件测试的准确性，制备过程中采用高精度石材切割机对圆柱形试件进行初加工，随后利用精细磨轮对受拉段进行打磨，以确保其轴线对中性并减少表面应力集中。尽管由于材料脆性未采用劈裂试验进行交叉验证，但通过在试件中部粘贴应变片实时监测应力分布，证实了受拉段内应力分布均匀且未出现明显的偏心受力现象。本研究将动态压缩模量与准静态拉伸模量纳入同一模型，是基于固化土在服役初期的线弹性响应应具有模量依赖性而非速率敏感性的理论假设，这符合 Ambartsumyan 双模量理论对准脆性材料的基本定义。此外，为确保数据的代表性，每组试验均制备了 6 组平行试样。经统计分析，固化土的抗压回弹模量 E_c 均值为 (1850 ± 42) MPa，抗拉回弹模量 E_t 均值为 (1050 ± 31) MPa。各组数据的变异系数均控制在 5% 以内，表明本研究所得模量参数具有良好的可复现性和统计学意义。

为了获得固化土回弹模量和应力的关系，对固化土进行动态回弹模量试验。试验采用 DTS 三轴试验仪，侧压加载方式为气压；轴向荷载测试波形采用半正弦波加载，频率为 1 Hz，加载时间为 0.1 s，间歇时间为 0.9 s，加载序列参照公路土工试验规程。固化土回弹模量和应力的关系拟合曲面见图 4，模型回归参数见表 2。

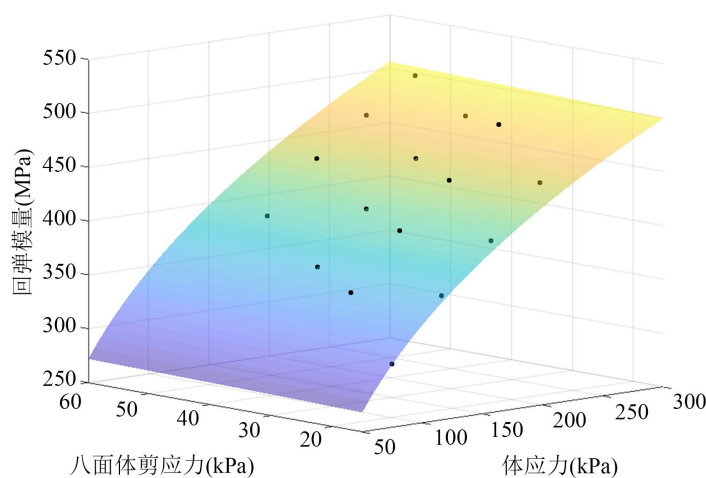


Figure 4. Fitted surface of dynamic resilient modulus of solidified soil with respect to volume stress and shear stress
图 4. 固化土动态回弹模量与体应力及剪应力关系拟合曲面

Table 2. Regression parameters of the dynamic resilient modulus model for solidified soil
表 2. 固化土动态回弹模量模型回归参数

k_1	k_2	k_3	R^2
3394	0.3468	0.0399	0.98

2.2.2. 小梁三点弯曲试验

试验采用电子万能试验机进行, 见图 5。将养护至规定龄期的试件置于试验台上, 试件尺寸为 50 mm × 50 mm × 200 mm, 支座跨径设定为 150 mm。试验采用位移控制方式加载, 加载速率设定为 1 mm/min。试验过程中同步采集竖向荷载与跨中挠度数据, 并依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)计算试件的抗折强度与弯拉模量。

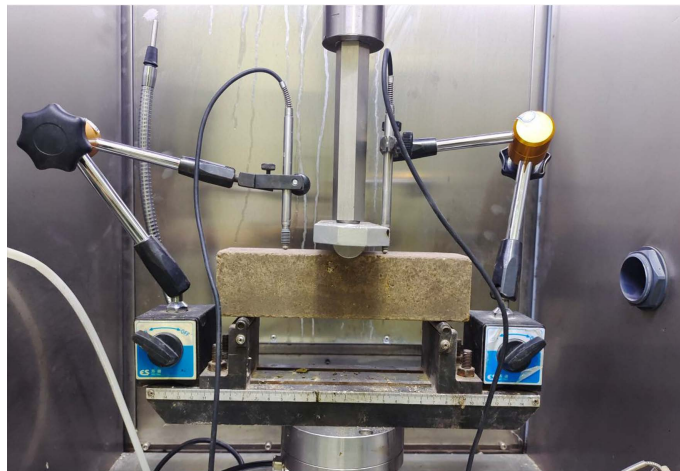


Figure 5. Loading site of the three-point bending test of the solidified soil beam
图 5. 固化土小梁三点弯曲试验加载现场

2.3. 双模量有限元模型构建

2.3.1. 双模量理论基础

Ambartsumyan 将材料在压应力和拉应力下的弹性模量分开处理, 分别使用压模量和拉模量, 将应力应变之间的非线性关系简化为线性, 对具有不同拉压弹性模量的材料将用双直线模型来确定其受拉和受压时的关系。其本构模型示意图见图 6。

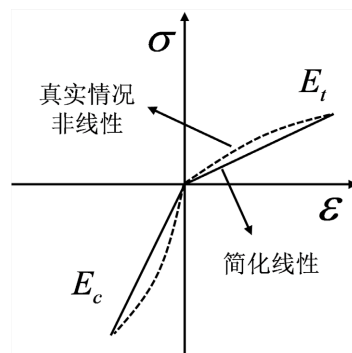


Figure 6. Schematic diagram of Ambartsumyan's bimodal constitutive model
图 6. Ambartsumyan 双模量本构模型示意图

该理论有如下基本假设：

- (1) 材料连续均匀且各向同性假设。
- (2) 材料只发生小变形假设，即经典弹性理论的基本方程和关系式不变。
- (3) 各点根据主应力符号选择不同的弹性模量和泊松比。

鉴于 Ambartsumyan 双模量理论中材料参数具有显著的应力状态依赖性，常规有限元分析中基于恒定刚度矩阵的线弹性本构模块无法直接描述这一特性。为了在数值计算中精确实现拉压模量的自动判别与切换，本文采用基于弱形式偏微分方程的自定义建模方法在 COMSOL Multiphysics 软件中进行实现。在计算定义部分，输入：

$$E = (E_c + E_t)/2 - ((E_c - E_t)/2) * \tanh(k * u13/Pa) \quad (1)$$

$$E_c = k_1 * P_a * (abs(u11)/P_a + eps)^{k_2} * (u12/Pa + 1)^{k_3} \quad (2)$$

在相应拉伸、压缩的两条明显表示的直线段之间，存在一个带有连续切线的狭窄的非线性过渡段。为了避免在数值计算中产生不连续性或数值震荡，必须引入一种平滑的方式来处理这一不对称刚度。这是因为直接使用不同的模量会导致应力 - 应变曲线的不连续或不光滑的变化，影响有限元计算的稳定性和精度。光滑函数法通过引入一个平滑过渡函数，在拉伸和压缩的过渡区间内，动态调整模量的值，使得材料的刚度变化更加平滑，从而避免了突变或不连续的现象。光滑函数能够确保计算过程中应力、应变分布的连续性和稳定性。

2.3.2. 有限元模型建立

本文利用 COMSOL Multiphysics 软件建立三点弯曲试件的二维数值模型，见图 7。

(1) 几何与网格：模型几何尺寸与室内试验一致(200 mm × 50 mm)。采用自由三角形网格进行离散，并对跨中受力区域进行网格加密处理，以保证计算精度。

(2) 边界条件与荷载：模拟试验机的真实约束，左侧支座设置为固定铰支，右侧支座设置为滚动铰支。荷载通过跨中顶部的边界指定位移加载。

(3) 本构模型：分别建立“单模量线弹性模型”与“Ambartsumyan 双模量模型”。其中双模量模型通过定义与主应力状态相关的材料属性，实现拉压模量的自动判别与切换。

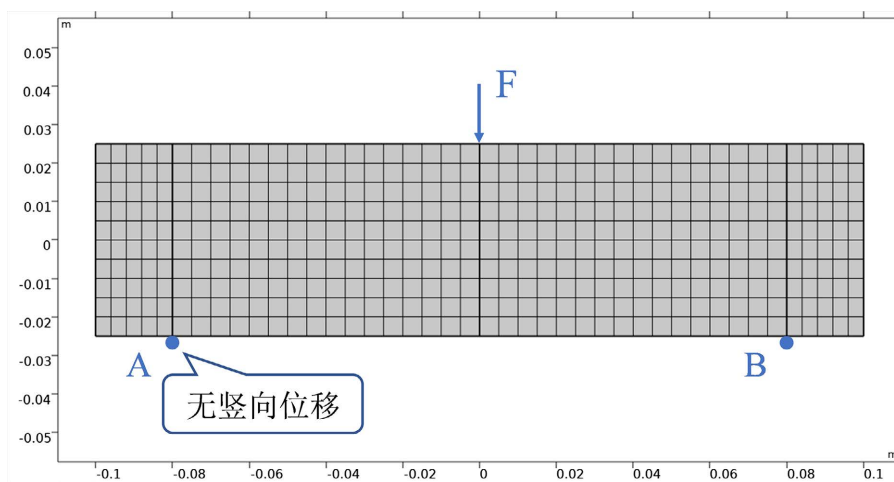


Figure 7. Dimensions and mesh generation of the finite element model of the three-point bending of the solidified soil beam

图 7. 固化土小梁三点弯曲有限元模型几何尺寸与网格划分

在 COMSOL Multiphysics 6.0 中, 将实际的小梁简化为二维模型, 建成的结构模型如图所示。长度 200 mm, 高度 50 mm, 与试验尺寸相匹配。c、d 两点为支点, 与左右端面距离为 20 mm, 其竖直方向位移固定为 0。在 a 点施加 Haversine 波形(半正矢波)荷载, 荷载峰值大小为 0.05 kN, 频率为 10 Hz, 无间歇时间, 模型网格。

对小梁模型进行了如下分析: 为验证模型在弹性阶段的准确性, 选取 0.05 kN (约为极限强度的 1/10) 作为无损检测荷载, 施加 Haversine 波形循环荷载(公式 3)。在该荷载水平下, 材料处于线弹性工作区, 累积损伤可忽略不计, 通过对比试验和模拟中 a 点与 b 点的挠度来验证模型的可靠性。然后为了评估材料在较大荷载下的裂纹扩展行为, 采用 0.2 kN 的动荷载水平。在本研究中, 进行了 200 次循环加载。加载函数如式所示:

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_0 (1 - \cos(20\pi t)) \quad (3)$$

3. 结果与讨论

3.1. 固化土拉压模量试验结果

基于前述试验方案, 分别对固化土试件进行了动态压缩与单轴拉伸测试。试验结果表明, 固化土的抗压回弹模量 E_c 为 1850 MPa, 而抗拉回弹模量 E_t 仅为 1050 MPa。计算可知, 该材料的压拉模量比约为 1.76, 表现出显著的拉压异性特征。这一结果证实了固化土并非理想的各向同性材料, 上述实测模量参数将作为核心变量输入至双模量有限元模型中。

3.2. 有限元模拟结果分析与验证

基于前述试验测得的拉压模量参数, 对固化土小梁的三点弯曲过程进行了有限元数值模拟。图 8 和图 9 分别展示了破坏荷载作用下的水平应力分布云图及跨中挠度动态响应时程对比曲线。

由应力云图可知, 在传统单模量模型中, 应力分布关于试件几何中心轴严格对称, 受拉区与受压区高度相等。然而, 引入双模量本构关系后, 应力场呈现非对称性。由于固化土的抗拉回弹模量小于抗压回弹模量, 试件下部受拉区的刚度较小, 导致受拉区域面积显著扩大, 应力等值线向受压区发生扩散。最显著的特征在于中性层的位置变化。在双模量模型中, 中性轴不再位于截面高度的 1/2 处, 而是向受压侧(梁顶方向)发生了上移。这种中性层偏移现象真实反映了准脆性材料为了平衡截面内的拉压合力, 必须通过减小受压区高度来适应其较高的抗压刚度。

为了验证模型的准确性, 图 9 进一步比较了三种模量模式下的表面挠度预测值与距离加载中心不同距离(0 cm 和 5 cm)的实测数据。结果表明, 本文建立的双模量模型计算得到的挠度值与实测数据吻合度最高, 两者曲线基本重合, 这也说明了模型的可靠性。相比之下, 单模量模型的挠度计算值均显著低于实测值。这表明传统模型由于忽略了材料受拉区模量的衰减, 从而高估了固化土小梁的整体抗弯刚度, 导致变形计算结果偏小, 无法准确预估路面基层的实际变形行为。

除挠度差异外, 数值模拟结果揭示了不同模式下梁底最大拉应力与拉应变的显著差异。在 0.2 kN 动荷载水平下, 传统单模量模型计算的梁底最大拉应力为 0.36 MPa, 而本文双模量模型预测的数值达到 0.41 MPa, 高出约 14%。相比应力, 应变层面的差异更为显著: 若单模量模型错误采用抗压模量作为统一参数, 其计算的梁底最大拉应变仅为 1.95×10^{-4} ; 而考虑受拉区模量衰减后的双模量模型实测拉应变高达 3.90×10^{-4} , 增幅达 100%。由于固化土基层的疲劳寿命与拉应变呈高阶指数关系, 100% 的应变偏差将导致理论预估寿命缩短数倍甚至十倍以上, 这从力学本质上解释了为何许多基层在实测弯沉达标的情况下仍会出现早期开裂, 充分论证了传统单模量设计“偏于不安全”的结论。

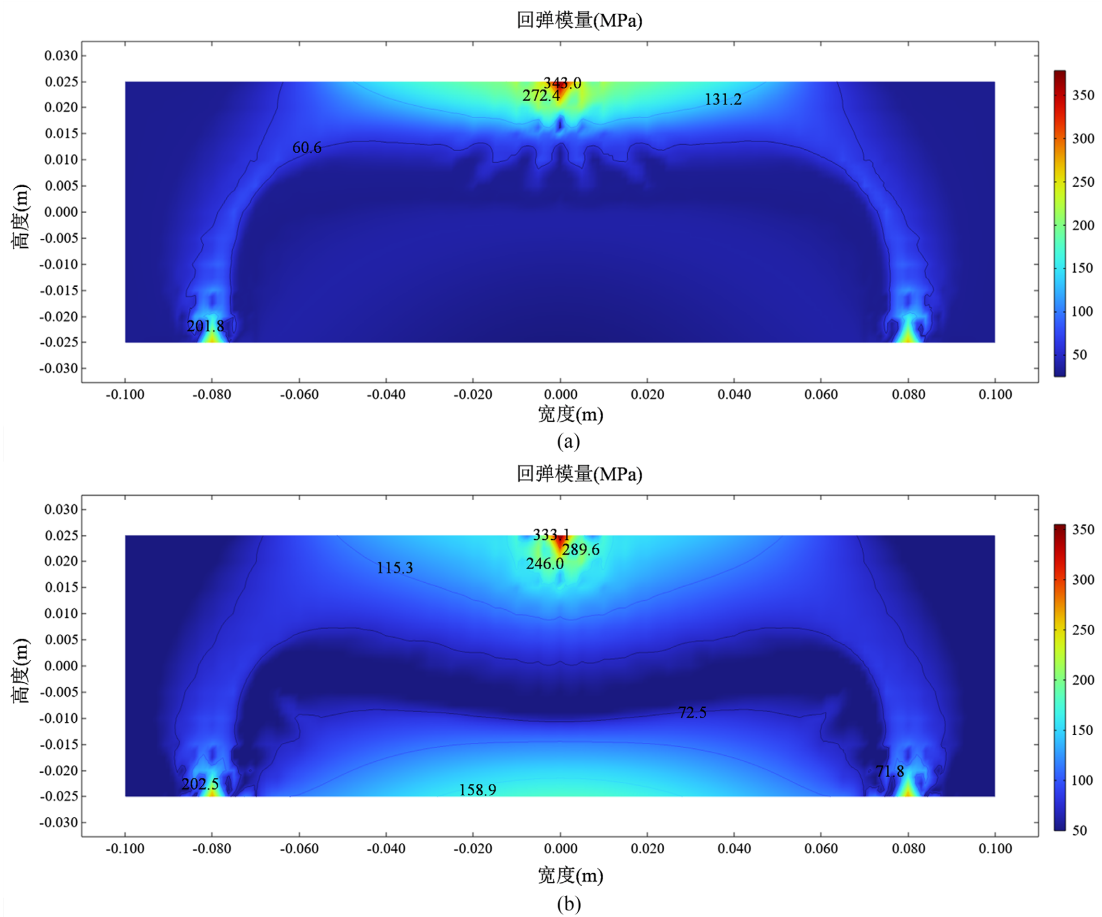


Figure 8. Horizontal stress distribution cloud map of solidified soil beams under different modulus modes. (a) Stress contour plot of a single-modulus model; (b) Stress contour plot of the dual-modulus model

图 8. 不同模量模式下固化土小梁水平应力分布云图。(a) 单模量模型应力云图; (b) 双模量模型应力云图

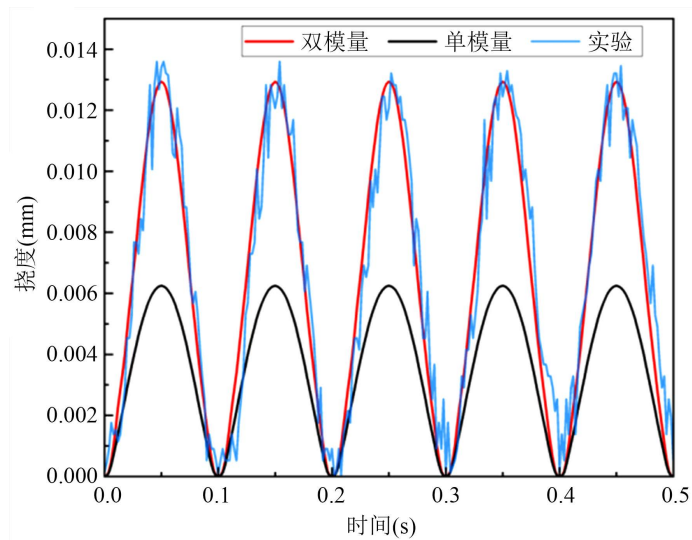


Figure 9. Comparison of time history curves of dynamic response to mid-span deflection

图 9. 跨中挠度动态响应时程对比曲线

此外, 本文根据双模量理论公式 $h_c = h / (\sqrt{n} + 1)$ 对中性轴位置进行了定量校核。代入 $n = 1.76$, $h = 50$ mm 计算得中性轴距受压边缘的高度 $h_c = 21.49$ mm, 即中性轴距梁底的高度为 28.51 mm, 较几何中心线上移了 3.51 mm。有限元模拟提取的中性层位置为 28.42 mm, 理论值与模拟值误差仅为 0.3%。中性轴的大幅上移实质上压缩了受压区并迫使受拉区承担更大的变形, 这正是双模量模型计算挠度远大于单模量模型的内在机理。

4. 结论

本文通过开展室内小梁三点弯曲试验与基于双模量理论的有限元数值模拟, 深入探讨了固化土路面基层材料的力学响应特征, 主要结论如下:

(1) 试验表明, 固化土材料并非理想的各向同性弹性体, 其抗压模量显著大于抗拉模量, 表现出明显的双模量特性。

(2) 基于传统单模量理论的计算方法会显著低估固化土路面基层在弯拉荷载下的变形量, 导致设计参数取值偏于不安全。

(3) 本文建立的双模量有限元模型能够有效模拟固化土的拉压异性力学响应, 计算结果与三点弯曲试验实测数据吻合良好, 可用于指导路面结构的精细化分析。

参考文献

- [1] Ambartsumyan, S.A. and Khachatryan, A.A. (1966) The Basic Equations of the Theory of Elasticity for Materials with Different Tensile and Compressive Stiffness. *Mechanics of Solids*, **1**, 29-34.
- [2] Lytton, R.L., Uzan, J., Fernando, E.G., et al. (1993) Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes. Strategic Highway Research Program.
- [3] 沙爱民, 胡力群. 半刚性基层材料的结构特征[J]. 中国公路学报, 2008(4): 1-5, 42.
- [4] Lv, S., Yuan, J., Liu, C., Wang, J., Li, J. and Zheng, J. (2019) Investigation of the Fatigue Modulus Decay in Cement Stabilized Base Material by Considering the Difference between Compressive and Tensile Modulus. *Construction and Building Materials*, **223**, 491-502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.003>
- [5] 潘勤学, 郑健龙, 文丕华. 不同模量理论广义弹性定律的深入研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 93-100.
- [6] 潘勤学, 郑健龙. 考虑拉压模量不同的沥青路面力学计算方法与分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 110-117.
- [7] Pan, Q.X., Zheng, J.L., Li, Q. and Wen, P.H. (2020) Fracture Analysis for Bi-Modular Materials. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **80**, Article ID: 103904. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.103904>
- [8] 潘勤学, 张同升, 魏玉峰, 等. 基于双模量理论的不同沥青路面力学分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 21-31.
- [9] 潘勤学, 周殊睿, 胡嘉, 等. 基于双模量理论的半柔性路面结构分析[J]. 中外公路, 2025, 45(3): 74-82.
- [10] 程怀磊, 孙立军, 郑健龙, 等. 沥青混合料动态压-拉双模量及其在路面响应分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 105-116, 128.
- [11] Dong, C., Wang, F., Wang, T., Zhao, L., Qian, P., Li, M., et al. (2025) A Finite Element Study of Bimodulus Materials with 2D Constitutive Relations in Non-Principal Stress Directions. *Materials*, **18**, Article 5126. <https://doi.org/10.3390/ma18225126>