

基于有限元模拟的后张法预应力损失评估

朱家镭, 孙润哲, 陈云飞, 卢佳鑫, 段钧文*

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月22日

摘 要

为研究后张法预应力混凝土梁在长期服役过程中的锚头局部下陷变形及预应力损失规律, 本文基于实测收缩徐变数据, 采用Midas FEA与Midas Civil有限元软件建立了精细化数值模型。混凝土采用实体单元, 预应力钢绞线采用桁架单元, 锚具及锚垫板采用刚性面单元, 并考虑嵌入式约束、面-面接触及绑定约束等连接方式。模型划分为制梁、存梁、架梁三个阶段, 以及混凝土浇筑养护、预应力张拉、锚固、长期服役四个施工阶段, 综合考虑锚具回缩、钢绞线松弛、收缩徐变及环境温度等时变效应。通过与6片试验梁在430 d内的实测数据进行对比分析, 为后张法预应力混凝土梁的锚固体系优化、预应力损失估算及长期性能评估提供了数值与试验双重依据。

关键词

后张法预应力混凝土梁, 有限元分析, 预应力损失, 收缩徐变, 锚头下陷

Evaluation of Post-Tensioned Prestress Loss Based on Finite Element Simulation

Jiarong Zhu, Runzhe Sun, Yunfei Chen, Jiaxin Lu, Junwen Duan*

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: June 17, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 22, 2026

Abstract

To investigate the local subsidence deformation of anchor heads and the associated prestress loss in post-tensioned prestressed concrete beams during long-term service, this paper establishes a refined numerical model using the finite element software Midas FEA and Midas Civil, based on measured shrinkage and creep data. Concrete is modeled with solid elements, prestressing strands with truss elements, and anchorages and bearing plates with rigid surface elements, incorporating connection

*通讯作者。

文章引用: 朱家镭, 孙润哲, 陈云飞, 卢佳鑫, 段钧文. 基于有限元模拟的后张法预应力损失评估[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 76-83. DOI: 10.12677/hjce.2026.157180

types such as embedded constraints, surface-to-surface contact, and bonded contacts. The model is divided into three stages—beam fabrication, storage, and erection—and four construction phases: concrete casting and curing, prestressing tensioning, anchoring, and long-term service. Time-dependent effects, including anchor set, strand relaxation, shrinkage and creep, and ambient temperature, are comprehensively considered. Through comparative analysis with measured data from six test beams over a period of 430 days, this study provides both numerical and experimental bases for the optimization of the anchorage system, estimation of prestress losses, and long-term performance evaluation of post-tensioned prestressed beams.

Keywords

Post-Tensioned Prestressed Concrete Beams, Finite Element Analysis, Prestress Loss, Shrinkage and Creep, Anchor Head Subsidence

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

后张法预应力混凝土结构因其承载能力强、裂缝控制好而被广泛应用于桥梁与建筑领域。然而，预应力损失问题长期影响结构的安全性与耐久性。预应力损失主要源于锚具变形与回缩、钢绞线松弛、混凝土收缩徐变及孔道摩擦等因素，其中锚固区局部变形所引发的附加损失往往在常规设计中难以准确计入。

针对锚固损失的计算方法，伍彦斌等[1]提出了一种基于有效内力作用的“虚拟张拉法”，通过编制 APDL 程序实现了任意线形预应力筋锚固损失的高精度数值计算，有效改善了传统方法中正反向摩擦对称假设与实际不符的问题。在收缩徐变与松弛效应方面，蒋庆等[2]通过现场试验和数值模拟相结合的方法，系统研究了后张法 PC 梁张拉后 48 h 内锚下预应力衰减规律，建立了时间效应影响下的预应力损失率数学拟合模型。赖用满等[3]采用足尺梁实测方法，将温度、钢绞线松弛、混凝土收缩、徐变等影响因素进行分离，建立了有效预应力衰减的时变模型，并找出了 48 h 内有效预应力相对稳定的测试时机。钟永新等[4]结合五峰山长江大桥引桥节段梁预制拼装案例，分析了节段梁在存梁期收缩、徐变的不同模拟方式及其对施工控制精度的影响。在有限元数值模拟方面，毛德均等[5]采用 Midas/Civil 系统分析了预应力损失程度对大跨度 PC 连续梁桥主跨跨中挠度和下缘压应力的线性影响规律，表明有限元方法可有效评估预应力损失对结构性能的影响。刘浩波[6]以京滨高速铁路预制箱梁张拉工序为例，从施工过程控制和原材料控制两方面探讨了控制预应力损失的有效措施。

目前，将锚头局部下陷变形纳入精细化有限元模型并与长期实测数据对比的研究仍较少。本文以 6 片后张法预应力混凝土试验梁为对象，基于 430 d 长期监测数据，采用 Midas FEA 与 Midas Civil 有限元软件建立精细化数值模型，综合考虑锚具回缩、钢绞线松弛、收缩徐变及环境温湿度等时变效应，通过实测位移与模型计算值之差分离锚头下陷位移，分析其对预应力损失的影响规律，为后张法预应力梁锚固参数优化及长期性能评估提供依据。

2. 有限元模型建立

2.1. 试验梁概况和几何建模

在进行建模过程中，采用本次实测试验所得到的收缩徐变数据进行建模，选取单根面积为 $A = 139$

mm² 的低松弛高强度预应力钢绞线, 因此在松弛率小于 0.035 情况之下建模所采用具体参数如下:

$f_{ptk} = 1860 \text{ MPa}$; $\sigma_{con} = 855 \text{ MPa}$; $E_p = 1.95 \times 10^5$; $k = 0.0018$; $u = 0.20$ 。

混凝土采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)收缩徐变模型, 钢绞线采用理想弹塑性本构。边界条件按简支模拟, 一端约束竖向与横向位移, 另一端仅约束竖向位移。模型划分为混凝土浇筑、预应力张拉、锚固、长期服役四个施工阶段, 考虑锚具回缩、钢绞线松弛、收缩徐变及时变效应, 与试验过程完全一致。

2.2. 试验材料本构与参数选取

1) 混凝土: 弹性模量 $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$, 轴心抗压强度 29.6 MPa , 采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)收缩徐变模型, 环境相对湿度取 60%;

2) 钢绞线: 弹性模量 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$, 抗拉强度标准值 1860 MPa , 张拉控制应力 $0.75 f_{ptk} = 1395 \text{ MPa}$, 采用低松弛模型, 1000 h 松弛率取实测值 2.51%;

3) 锚具: 采用 OVM15-1 型夹片锚, 锚垫板尺寸 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$, 设置为刚性接触单元。

2.3. 预应力钢束建模与损失设置

钢绞线采用直线布束, 两端锚固, 张拉方式为同步张拉。预应力损失参数按试验实测值输入:

- 锚具瞬时回缩位移: 5.90 mm ;
- 长期等效回缩位移: 7.664 mm ;
- 钢绞线松弛: 按 120 h 实测数据外推 1000 h 松弛率: 2.51%;
- 收缩徐变: 按试验梁实测配合比、养护龄期、环境参数输入。

2.4. 边界条件与荷载工况

边界条件采用简支约束: 一端约束竖向、横向位移, 另一端仅约束竖向位移, 允许纵向自由变形, 与试验支承条件一致。荷载工况包括:

- 结构自重;
- 预应力张拉荷载和等效荷载;
- 长期收缩徐变时变效应;
- 环境温度作用(按试验实测温度修正)。

为真实反映后张法预应力形成过程, 将计算过程划分为 4 个施工阶段, 还原实际施工与服役过程:

阶段 1: 混凝土浇筑养护, 达到设计强度;

阶段 2: 张拉预应力钢束并施加初始预应力;

阶段 3: 预应力筋张拉、锚固, 考虑瞬时锚具回缩损失;

阶段 4: 长期服役, 激活钢绞线松弛效应、混凝土收缩徐变, 模拟 430 d 时变效应。

2.5. 锚头局部下陷计算方法

$$\Delta = \frac{\Delta F \cdot L}{E_p A_p} \quad (1)$$

式中:

ΔF —— 实测力值与模型力的差值(kN);

L —— 钢绞线有效长度(mm);

E_p —— 钢绞线弹性模量(按规范取 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$);

A_p ——单根钢绞线截面积($\phi 15.2$ 钢绞线取 140 mm^2 ，按实际配筋数量修正)。

3. 模拟结果与理论计算对比分析

试验梁养护结束至张拉存在时间间隔，期间混凝土发生收缩变形，影响后续预应力损失。为真实反映受力过程，有限元分析划分为制梁、存梁、架梁三个阶段。图 1、图 2 分别为试验梁有限元模型及锚具位移情况。

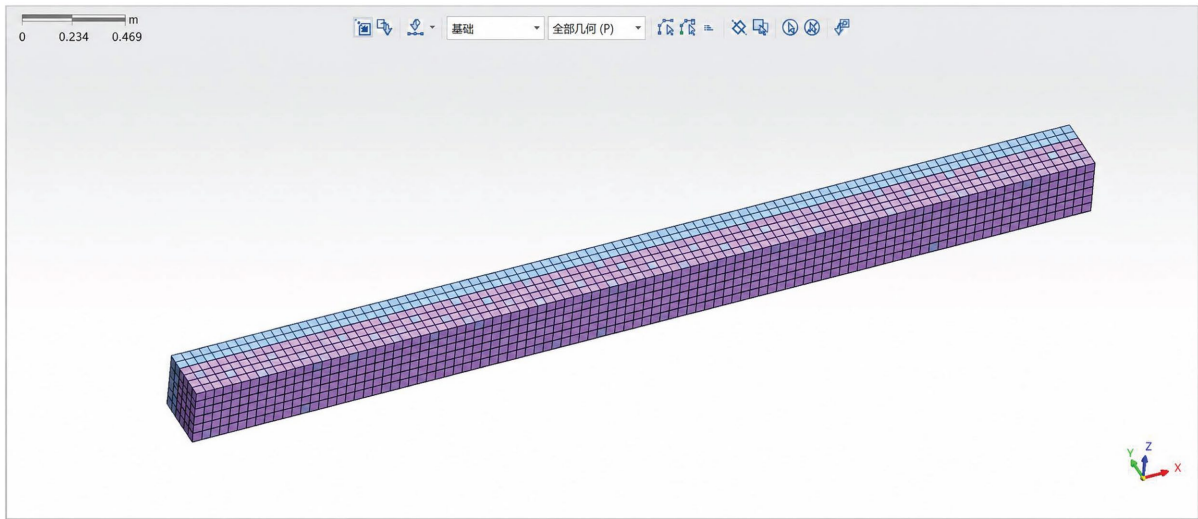


Figure 1. Schematic diagram of modeling results
图 1. 建模结果示意图



Figure 2. Displacement diagram of solid elements (mm)
图 2. 实体单元位移图(mm)

本研究中预应力钢束采用同时张拉方式施加，即各钢束在同一施工阶段内同步张拉完成，避免了分批张拉引起的混凝土多次弹性压缩及应力重分布效应。由有限元计算结果可知，实体梁单元内力沿梁长呈连续变化趋势，其分布主要受预应力沿程摩阻损失控制。

取出 Midas FEA 中局部张拉情况，如图 3 所示。由有限元应力云图可见，在单端张拉工况下，锚头处局部受力较大，引起混凝土压缩及局部下陷导致理论值偏小，预应力自张拉端向梁跨内逐渐衰减，从而使梁内弯矩由张拉端向另一端逐步减小。该高应力区呈现明显的空间扩散特征，说明锚固区混凝土受力处于复杂三向压应力状态。

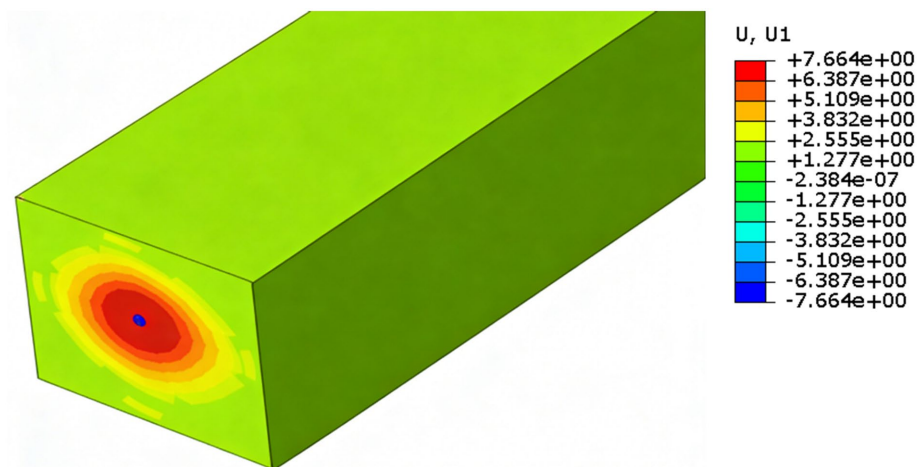


Figure 3. Displacement of the anchor device at the tensioning end after failure and contraction
图 3. 张拉端锚具破坏回缩位移

在该应力状态下，锚垫板下方混凝土不仅发生弹性压缩，还可能伴随局部塑性变形及微裂缝发展，从而导致锚固端产生一定程度的“局部下陷”现象。该下陷将直接引起预应力筋等效长度缩短，使实际伸长量小于理论计算值，进而导致预应力损失增大。

模型计算结果反映了理想状态下仅由材料时变特性产生的位移变化，而现场实测结果则包含了混凝土收缩、徐变以及锚头局部受力变形的综合效应。由于实测位移中除收缩与徐变外，还包含锚具受力后的局部下陷、锚下混凝土压缩变形以及锚具滑移等不可忽略的附加位移，因此可通过实测值与模型计算值的差值，将锚头局部下陷位移从总位移中分离出来。

基于上述实测与计算差值法即可得到锚头局部下陷位移，该位移可定量反映锚具在长期预应力作用下的局部变形特性，为评估锚固体系可靠性提供依据。选取全注浆的预应力梁，在模型计算结果的后期阶段，选取第 1~7 天以及第 14、21、28、35、42、50、60、80、90、100、120、140、160、180、270、300、330、380 以及 430 天的收缩与徐变数值，并与对应的实测结果进行对比分析，具体对比结果如下表 1 所示。

Table 1. Model value combined with force value
表 1. 模型值综合力值

测量时间/天	1#梁力值(kN)	2#梁力值(kN)	5#梁力值(kN)	6#梁力值(kN)	9#梁力值(kN)	11#梁力值(kN)
1	381	396	374	434	384	279
2	380	395	373	432	382	278
3	379	393	371	430	380	276
4	377	391	369	428	378	274
5	375	389	367	426	376	272
6	373	387	365	424	374	270
7	371	385	363	422	372	268
14	357	371	350	407	358	256
21	345	359	338	394	346	246
28	335	349	328	382	336	238
35	326	340	319	372	327	231

续表

42	319	332	312	364	320	225
50	312	325	305	356	313	220
60	305	318	298	348	306	215
80	293	306	287	335	295	207
90	288	301	282	329	290	204
100	284	297	278	324	286	201
120	276	289	272	315	278	195
140	269	282	263	307	271	190
160	263	276	257	300	265	186
180	258	271	252	294	260	182
270	238	251	233	272	240	170
300	233	246	228	266	235	167
330	228	241	224	261	230	164
380	221	234	217	253	223	160
430	215	228	211	246	217	156

Table 2. Modified original data record table of the daily shrinkage and creep prestressing part
表 2. 修正后的每日收缩预应力部分原始数据记录表

测量时间	温度 (°C)	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#
力值(kN)													
最大张拉力	18.6	480	490	475	490	484	526	409	497	500	469	377	460
第 1 天	15.0	378	393	362	384	371	432	322	390	382	376	277	353
第 2 天	8.65	384	399	366	391	376	436	326	395	388	376	283	359
第 3 天	8.05	384	399	366	392	376	437	326	395	388	376	283	359
第 4 天	6.10	386	401	368	395	377	438	327	397	390	379	286	361
第 5 天	14.5	376	394	361	387	372	433	324	392	383	368	276	351
第 6 天	22.5	372	387	355	379	368	429	321	388	376	360	265	344
第 7 天	12.9	382	393	359	387	370	431	322	390	381	370	274	351
第 14 天	17.9	371	387	352	380	365	426	317	384	374	362	267	342
第 21 天	19.8	368	383	347	383	365	425	318	387	369	356	260	338
第 28 天	29.0	361	372	339	370	357	417	310	377	362	345	251	326
第 35 天	26.9	361	370	337	370	356	416	307	374	362	344	252	326
第 42 天	25.1	360	369	337	371	356	416	307	374	363	347	254	328
第 50 天	26.1	360	368	337	371	356	415	306	373	362	346	253	326
第 60 天	24.4	357	366	335	370	354	413	303	371	360	346	255	324
第 80 天	27.7	352	363	330	365	348	406	296	366	352	339	248	316
第 100 天	28.8	348	366	321	361	343	398	291	361	346	336	245	313

续表

第 120 天	36.6	342	360	323	358	329	386	280	357	335	329	235	307
第 140 天	28.8	346	362	325	362	332	390	282	361	336	333	240	311
第 160 天	30.1	342	364	322	365	336	386	277	362	333	335	239	311
第 180 天	33.9	335	359	323	359	322	388	277	355	330	331	234	307
第 270 天	22.9	333	366	325	367	320	388	271	363	329	339	246	314
第 300 天	19.1	336	360	324	372	325	391	280	365	331	345	251	318
第 330 天	17.0	337	363	323	372	333	400	275	361	327	347	253	320
第 380 天	15.1	334	364	323	369	329	394	279	364	331	341	252	318
第 430 天	18.3	333	360	319	369	329	395	277	365	329	341	254	317

表 1 中梁力值为有限元模型计算得到的预应力钢绞线有效拉力,反映了考虑锚具回缩、钢绞线松弛、混凝土收缩徐变及温度效应后的钢绞线实际受力水平。由于实测位移中除混凝土收缩与徐变变形外,还包含锚具在长期预应力作用下产生的局部下陷、锚下混凝土局部压缩变形以及锚具滑移等不可忽略的附加位移。因此,结合实测修正后的每日收缩预应力实测数据,如表 2 所示,与有限元模拟得到的表 1 中每日收缩预应力进行对比,通过实测总位移与模型计算位移的差值,将锚头局部下陷位移从总变形中分离出来,从而定量获取锚头局部变形的时变规律。各梁锚头局部下陷位移计算结果如表 3 所示。

Table 3. Final displacement value of anchor head settlement (mm)

表 3. 锚头下陷最终位移值(mm)

梁号	1#	2#	5#	6#	9#	11#
最终位移	5.78	6.62	5.15	7.30	5.59	5.85

基于 Midas Civil 有限元软件构建的后张法预应力梁精细化数值模型,通过表 2 全过程仿真导出计算数据结果表明,6 片试验梁最终锚头下陷位移分布在 5.15 mm~7.30 mm 区间,其中 6#梁位移最大为 7.30 mm,变形发展与锚具压密、锚下混凝土局部变形及界面滑移的力学演化规律完全一致。该结果较规范 6 mm 偏大,主要因规范取值偏理想化,未充分考虑实际工程中的局部压陷与长期滑移效应。结合实测与模拟结果,建议工程中将锚头回缩控制值调整为 8 mm,更符合实际受力状态。

由上述表 2 与表 1 模型计算结果与实测修正后力值对比可知:两者在变化趋势上基本一致,430 d 时 1#、5#、9#等梁的实测平均总预应力损失约 339.7 MPa,整体低于建议控制值,仅 9#梁实测损失(407.1 MPa)略超建议值,符合工程安全储备要求。均表现为前期损失较快、后期逐渐趋于稳定的规律,但有限元计算结果整体略高于实测值,即表现为预应力损失偏小。差异主要源于:一是实际环境温湿度波动使混凝土收缩徐变发展更剧烈,而模型采用理想化函数,低估了预应力损失;二是数据拟合平滑了实测离散性,削弱了损失幅度;三是模型未完全复现张拉前混凝土初始收缩的累积效应,导致初始应力偏高;四是实测数据受锚具微滑移、长期回缩影响,预应力值偏低。

另外,基于 Midas FEA 有限元软件构建的后张法预应力梁精细化数值模型,通过图 2 所示全过程仿真计算得出:张拉端锚具瞬时回缩位移为 7.664 mm,由此引起的锚具回缩预应力损失约为 373.5 MPa。将上述计算结果与工程实践建议控制值(对应预应力损失 390 MPa)对比可知:本次计算值与建议控制值高度吻合,二者相对偏差仅为 4.2%,处于工程允许误差范围以内。

4. 结论

本章采用 Midas Civil 与 Midas FEA 有限元软件, 建立与试验梁完全一致的精细化数值模型, 考虑锚具接触、混凝土收缩徐变、温度效应及锚头局部下陷等多因素耦合作用, 对直线后张 PC 梁的预应力损失全过程进行数值模拟, 并将模拟结果与试验实测、规范计算进行多维度对比验证, 系统揭示了锚头局部下陷的力学机理与影响规律, 主要结论如下:

1) 有限元模型能够较好地反映预应力损失的发展趋势。模拟结果表明, 预应力损失随时间呈现“前期快速发展 - 中期逐渐放缓 - 后期趋于稳定”的演化规律, 与试验实测数据在变化趋势上基本一致。短期损失及弹性阶段的模拟结果与实测值吻合较好, 验证了模型及参数选取的合理性。

2) 单端张拉条件下锚固区应力集中效应显著。有限元应力云图显示, 在单端张拉工况下, 锚头处局部受力较大, 引起混凝土压缩及局部下陷, 导致理论计算值偏小。该高应力区呈现明显的空间扩散特征, 说明锚固区混凝土受力处于复杂三向压应力状态, 锚下混凝土产生局部压缩与塑性下陷, 直接造成预应力筋等效长度缩短。

3) 所建立的有限元模型能够较好还原后张 PC 梁预应力损失的全过程演化规律, 模拟结果与实测数据趋势高度吻合, 最大误差约 8.6%, 平均误差小于 5%, 满足工程精度要求, 验证了模型参数选取、边界条件与施工阶段划分的合理性。

4) 数值模拟得出锚具总回缩位移约 7.664 mm, 对应预应力损失约 373.5 MPa, 建议取 8 mm 作为控制值。

参考文献

- [1] 伍彦斌, 黄方林. 后张法预应力筋锚固损失计算的虚拟张拉法[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 82-87.
- [2] 蒋庆, 徐嵩基, 李涛. 钢绞线张拉后 48 h 内锚下预应力随时间衰减效应研究[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 105-109.
- [3] 赖用满, 谢发祥, 杨腾飞. 锚下预应力衰减及拉脱法测试时机研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(35): 163-166.
- [4] 钟永新, 朱其敏. 节段梁预制拼装期间收缩徐变及预应力损失分析[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 126-132.
- [5] 毛德均, 余文正, 许鹏, 等. 大跨度 PC 连续梁桥预应力损失影响研究[J]. 公路工程, 2022, 47(2): 26-31.
- [6] 刘浩波. 后张法预制箱梁预应力损失探讨[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2021, 33(1): 34-36, 54.