引用格式　许庆,李嘉伟,曾滨,等. 基于实测预应力值的既有混凝土构件性能推定方法[J]. 工业建筑,2024,54(8):1-8. XU Q, LI J W, ZENG B, et al. A Performance Estimation Method for Exsiting Concrete Components Based on Measured Prestress Values[J]. Industrial Construction,2024,54(8):1-8 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG23051901

基于实测预应力值的既有混凝土构件性能推定方法*

许　庆[1,2]　李嘉伟[1]　曾　滨[1]　徐晓达[1]　张灏达[1]

(1.中冶建筑研究总院有限公司, 北京　100088; 2.清华大学土木工程系, 北京　100084)

摘　要　为了提出既有预应力混凝土构件考虑有效预应力分布的性能评定方法,揭示有效预应力抽样检测值与预应力混凝土结构性能分析特征参数的映射关系,验证预应力混凝土结构有效预应力基于高斯混合统一概率模型的总体分布规律。在实测有效预应力值样本数据的基础上,基于统一概率模型采用特征加权法和最大期望算法(EM)等概率统计方法,提取有效预应力分布典型特征,并引入95%保证率条件下的承载力特征值对结构服役性能进行定量计算,提出了一种基于实测样本数据的既有预应力混凝土构件性能推定方法。以某无黏结预应力混凝土结构为工程实例,使用设计复核法与特征值法分别评价结构服役性能。研究表明,与现行评价方法相比,特征值法能较好地拟合实际情况,且能够有效地保证结构的安全性和可靠性,可为既有预应力混凝土结构的性能评价和加固设计提供参考依据。

关键词　预应力混凝土结构;有效预应力;统一概率模型;实测样本数据;评价特征值

A Performance Estimation Method for Exsiting Concrete Components Based on Measured Prestress Values

XU Qing[1,2]　LI Jiawei[1]　ZENG Bin[1]　XU Xiaoda[1]　ZHANG Haoda[1]

(1. *Central Research Institute of Building & Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing* 100088, *China*;
2. *Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: In order to put forward a performance evaluation method for existing prestressed concrete members considering the distribution of effective prestress, reveal the mapping relationship between the sampling test values of effective prestress and the characteristic parameters of the performance analysis of prestressed concrete structures, and verify the overall distribution law of effective prestress of prestressed concrete structures based on Gaussian mixture unified probability model, based on the sample data of the measured effective prestress values, the typical characteristics of the effective prestress distribution are extracted by the probabilistic and statistical methods such as feature weighting method and maximum expectation algorithm (EM) based on the unified probability model, and the characteristic value of the bearing capacity under the condition of 95% guarantee rate was introduced for quantitative calculation of the service performance of the structure. A method for predicting the performance of existing prestressed concrete members based on measured sample data was proposed. Taking an unbonded prestressed concrete structure as an engineering example, design review method and eigenvalue method were used to evaluate the service performance of the structure respectively. The results showed that compared with the existing evaluation methods, the eigenvalue method could better fit the actual situation and effectively ensure the safety and reliability of the structure, so as to provide a reference for the performance evaluation and reinforcement design of the existing prestressed concrete structures.

Keywords: prestressed concrete structure; effective prestress; unified probability model; measured sample data; evaluation of characteristic values

* 十四五重点研发计划(2022YFC3801800);国家自然科学基金项目(52378320,52308334)。

第一作者:许庆,工学硕士,教授级高级工程师,主要从事预应力结构性能研究。

电子信箱:xuqing@cribc.com

收稿日期:2023-05-19

© 2024 工业建筑

预应力技术节材节能、空间跨越能力强,广泛应用于工业与民用建筑、公铁桥梁等各类重要土木工程中。随时间推移,我国大量既有预应力混凝土结构进入服役中后期,其性能的鉴定和评价需求与日俱增。

有效预应力是影响结构服役性能的重要因素[1-2]之一。预应力损失过大将导致构件挠度增大、产生裂缝、承载力降低[3-4],严重时可能导致安全事故。然而,由于预应力筋隐蔽性强、测量难度大,现有的评价方法主要是围绕材料损伤、构件变形等常见的病害特征对结构的实时服役性能进行评价,而有关结构中的有效预应力值多采用设计复核的方法进行计算[5-6]。赵煜等[7]基于主要受力裂缝的外观统计特征,通过构造损伤单元,建立了基于裂缝统计特征参数的损伤预应力混凝土箱梁计算模型,对预应力混凝土梁开裂后承载力进行评估。胡少伟等[8]对宁波某泊位码头结构采取原位静载试验与数值仿真分析相结合的手段,以雷达深度为检测指标,对其面板进行服役性态安全评价。程寿山等[9]等根据预应力损失影响因素和预应力连续梁桥变形特点,提出了以变形为主要指标的挠度反算有效预应力值方法。然而,大量工程数据表明,既有结构的实测有效预应力水平与规范设计值往往偏差较大。上述设计复核评价方法未考虑既有结构有效预应力的实际分布特征,难以保证评价的准确性。

近年来,随着检测技术的发展,拉脱法、应力释放法等检测方法使既有预应力混凝土结构实时有效预应力的原位测量得以实现[10-12],但由于预应力混凝土结构中预应力筋数量大、分布广、离散性强,单一零散的实测有效预应力值仍然无法准确表达既有结构预应力分布整体性态。针对此问题,笔者所在研究团队[13]建立了预应力筋集高斯混合模型对有效预应力值的不均匀性与不确定性进行特征分析。但现有研究仍聚焦于准确获取结构内有效预应力值与描述结构内有效预应力值分布特征,而如何根据实测数据对结构性能进行评价的问题亟待解决。

鉴于此,本文基于有效预应力实测样本,对结构预应力体系不同分布模式进行分类讨论,基于统一概率模型特征,提出抽样结果的既有预应力混凝土构件有效预应力推定方法,实现考虑有效预应力值分布的既有混凝土结构实时性态评定。并以无黏结预应力混凝土实际工程为例,验证了评价方法有效性。研究成果提高了预应力结构评价的科学性、准确性,为既有预应力混凝土结构性能评价提供了可行方案。

1　既有结构有效预应力实测统计特征

作者所在单位针对无黏结预应力结构已积累大量有效预应力值检测数据,基于工程实测数据建立有效预应力分布概率直方图,如图 1 所示。实测数据统计如表 1 所示。

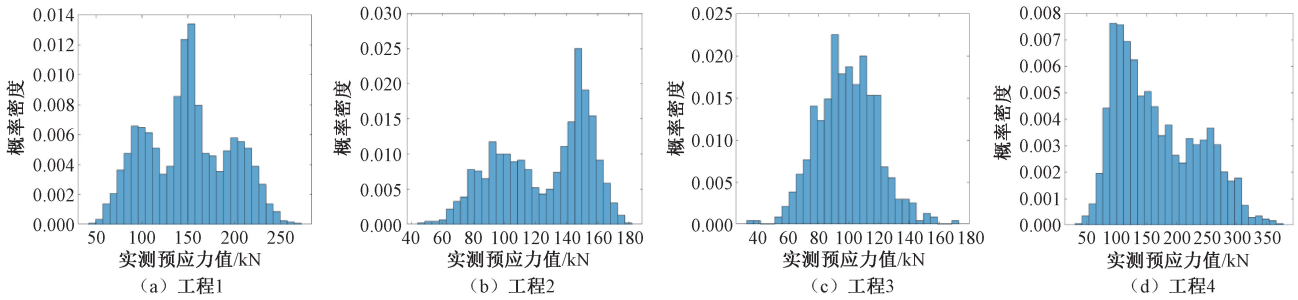


图 1　实测有效预应力值直方图

Fig. 1　Histogram of measured effective prestress values

由图 1 可知,不同结构的有效预应力值分布有较大差异,直方图呈现单峰或者多峰形式,究其原因是大部分预应力混凝土结构由数十类不同物理性质(如尺寸大小、材料强度、布筋情况等)的梁、板、柱构件(简称:子构件)组成,对两种性状差异较大的子构件中包含的预应力筋集而言往往二者的有效预应力值分布有较大差异,归属于同类子构件的预应力筋集以高斯分布或近似高斯分布的形式出现,而多组性状差异较大的子构件组成的整体结构有效预应力分布可能由两个或多个高斯分布共同构成,由此引入高斯混合模型对此种分布进行定量描述。因此,在结构评价中,应基于实测数据判断结构中预应力分布类别,采用对应的分布模型进行针对性评价。

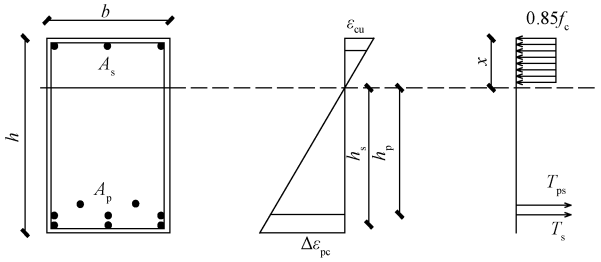
表 1　实测数据统计

Table 1　Statistics of measured data

工程	子分布	均值/kN	标准差	权重
工程 1	子分布 1	91.13	19.54	0.34
	子分布 2	156.51	11.70	0.42
	子分布 3	193.22	24.49	0.24
工程 2	子分布 1	87.40	15.91	0.58
	子分布 2	147.66	9.89	0.42
工程 3	—	95.15	13.68	—
工程 4	子分布 1	95.64	17.64	0.73
	子分布 2	258.15	21.51	0.27
工程 5	子分布 1	79.45	10.01	0.47
	子分布 2	95.11	4.47	0.53
工程 6	子分布 1	105.41	15.18	0.88
	子分布 2	140.47	7.68	0.12
工程 7	子分布 1	110.02	4.28	0.61
	子分布 2	121.13	2.22	0.39
工程 8	子分布 1	131.00	0.85	0.18
	子分布 2	139.93	6.93	0.82

2　预应力混凝土构件承载力评价特征值

现有研究表明,有效预应力值是确定构件承载能力的重要指标。对于受弯构件,现有评价方法采用设计值对结构承载力进行计算,对预应力混凝土梁正截面承载力计算时,梁破坏截面采用图 2 所示的受力状态。



ε_{cu} 为正截面的混凝土极限压应变;$\Delta\varepsilon_{pc}$ 为正截面的混凝土极限拉应变;f_c 为混凝土圆柱体抗压强度;T_{ps} 为受拉区预应力筋合力;T_s 为受拉区普通钢筋合力。

图 2　无黏结预应力混凝土梁截面受力示意

Fig. 2　Schematic diagrams of the cross-section of an unbonded prestressed concrete beam

承载力计算公式如式(1)所示:

$$M_u = \sigma_{pu}A_p\left(h_p - \frac{x}{2}\right) + f_yA_s\left(h_s - \frac{x}{2}\right) \quad (1)$$

式中:M_u 为构件承载能力;σ_{pu} 为极限状态下预应力筋值;A_p、A_s 分别为预应力筋与普通钢筋截面面积;h_p、h_s 分别为无黏结预应力筋、普通钢筋合力点至截面受压区边缘的距离;f_y 为普通钢筋抗拉强度设计值;x 为混凝土受压区高度。

因此需要考虑结构有效预应力实际分布情况,对服从高斯或者高斯混合的有效预应力分布取用合理定值预应力进行表征,对于此定值的确定需要对结构的安全性准确把握,若定值取用不当,则结构有使用性能不足、甚至破坏的可能。对服从高斯分布的有效预应力分布而言,均值是确定高斯分布形态的参数之一,但采用有效预应力均值计算结构承载能力忽视了数据的离散特性,导致评价结果严重高估了结构性能,这种情况对结构评价是偏于危险的。在土木工程领域中,95%保证率条件下特征值是最常用的特征值[14-15],例如钢筋抗拉强度、混凝土抗压强度等标准值都是据此而定,表明一个随机参数大于该特征值的概率为 95%。为保障结构服役安全,将此思想引入至预应力结构评价中,采用 95%保证率下限作为特征值评价既有构件的承载能力。

此外,由统计学可知,构件总体概率分布 $Q(x)$ 是由各单筋概率分布 $p(x)$ 叠加而成,对构件内单筋取 95%保证率下限进行考量会对构件承载能力产生较大低估,因此考虑构件承载能力的累加作用,采用构件单筋特征值 F' 对结构进行性能评价。

在有效预应力服从高斯分布的结构中,使用单筋实测样本估计结构有效预应力概率分布 $p(x)$,根据大数定律可知,单筋概率分布同样服从 $p(x)$,因此对单筋概率分布 $p(x)$ 进行叠加,叠加次数为服从单筋概率分布 $p(x)$ 的预应力筋根数,即同类构件中预应力筋根数,叠加后得到构件总体概率分布 $Q(x)$,根据 $Q(x)$,计算构件单筋特征值 F'。而归属于不同子构件的预应力筋集,结构有效预应力概率分布 $p(x)$ 服从高斯混合分布,叠加过程为首先将高斯混合模型分为数个子高斯分布,子分布叠加过程与服从高斯分布的结构叠加过程相似。

2.1　基于高斯模型的承载力评价特征值

若构件中各单筋有效预应力服从同一高斯分布,构件叠加后总体预应力分布为:

$$Q(x) = \sum_{i=1}^{m} p(x\,|\,\mu,\sigma^2) \quad (2)$$

式中:m 为叠加样本个数;μ 为有效预应力值均值;σ 为有效预应力值标准差。

根据高斯分布的叠加原理,对服从高斯分布 $P(\mu,\sigma^2)$ 的实测样本经 m 次叠加后 $Q(x)$ 依然服从高斯分布,且分布规律为 $Q \sim N(m\mu, m\sigma^2)$。根据

标准高斯分位表与高斯分布性质可知,高斯分布90%等尾置信区间下限分位点为高斯分布95%保证率特征值,可由式(3)确定:

$$\begin{cases} F_{\mathrm{L}} = m\mu - 1.645\sqrt{m}\sigma \\ F_{\mathrm{H}} = m\mu + 1.645\sqrt{m}\sigma \end{cases} \tag{3}$$

式中:F_{L} 为构件预应力总分布的95%置信区间下限;F_{H} 为构件预应力总分布的95%置信区间上限。

对应高斯分布承载力评价特征值:

$$F' = \frac{F}{m} = \mu - 1.645\frac{\sigma}{\sqrt{m}} \tag{4}$$

2.2　基于高斯混合模型的承载力评价特征值

若构件中各单筋有效预应力服从高斯混合分高斯混合模型概率密度函数 $\sum P(x)$ 为:

$$\sum P(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot p(x \mid \mu_i, \sigma_i^2) \tag{5}$$

式中:λ_i 为第 i 个子分布的权重;μ_i 为第 i 个子分布的均值;σ_i^2 为第 i 个子分布的标准差;n 为子分布个数。

本文借助最大期望算法(EM算法)[16]对样本进行处理。EM算法是一种求参数极大似然估计的迭代优化策略,在本模型中,可以从非完整样本(即抽样结果)中集中对参数进行极大似然估计。本模型样本空间为抽样预应力筋集的有效预应力值,通过EM算法确定每类子高斯分布的均值 μ,方差 σ 以及权重 λ,进而对结构内预应力筋准确分类。

EM算法的计算步骤可以分为两步,其中一个为期望步(E步),另一个为极大步(M步),其基本思想是:首先根据已经给出的观测数据(即抽样的有效预应力值),估计出模型参数的值;然后依据上一步估计出的参数值估计缺失数据的值,再根据估计出的缺失数据加上之前已经观测到的数据重新再对参数值进行估计,重复迭代过程,直至最后收敛,迭代结束。

由于解构后每个子分布都服从高斯分布,因此对各子分布构件单筋特征值,可以采用2.1节的方法进行确定,值得一提的是,其中各子分布叠加次数 I_i 由式(6)确定:

$$I_i = m\lambda_i \tag{6}$$

式中:m 为单筋实测样本数;λ_i 为各子分布权重。

式(6)表示对各子分布的叠加次数为分类后归属该子分布的单筋实测样本。因此式(4)在高斯混合模型中更新为式(7):

$$F'_i = \frac{F}{I_i} = \mu - 1.645\frac{\sigma}{\sqrt{I_i}} \tag{7}$$

由此计算每个子分布的特征值 $F'_1, F'_2, \cdots, F'_n$。在对承载力进行规范验算的过程中,对于 n 个特征值的情况难以处理,因此需要将 n 个子分布的特征值用一个高斯混合特征值进行总体表征,总体表征需要找出高斯混合分布叠加后的置信区间90%下限分位点 R,对于单筋服从高斯混合分布而言90%下限分位点 R 尚未有精确的数学方法进行计算,本文结合特征加权法进行高斯混合分布特征值计算并使用蒙特卡洛模拟验证方法的有效性。

特征加权法是为了考虑特征值对各子分布的不同贡献,获得更有效的特征值表征效果使用的加权方法。文中假定通过各子分布特征值特征加权得到的混合高斯分布特征值与高斯混合分布叠加后90%置信区间下限分位点 R 相等,由此特征加权法实现过程如下。

首先对高斯混合分布进行EM算法分类,提取分类后的各子分布占整体分布的权重组成权重向量 λ:

$$\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n]^{\mathrm{T}}$$

随后根据2.1节方法计算构件承载力评价单筋特征值 F:

$$F = [F'_1, F'_2, \cdots, F'_n]$$

最终根据式(8)计算高斯混合分布95%保证率下限分位点 R:

$$R = F \cdot \lambda \tag{8}$$

高斯混合分布95%保证率下限分位点 R 与子分布特征值 F 的关系如图3所示。

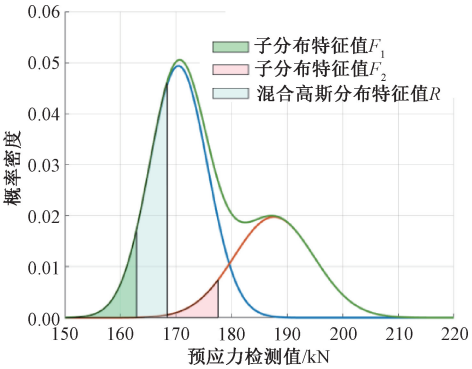


图3　双子分布 R-F 分位点

Fig. 3　Binary distribution of R-F sites

2.3　基于蒙特卡洛方法的高斯混合模型特征值验证

蒙特卡洛模拟[17-18]实现过程为首先确定高斯混合分布概率密度函数 $\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot p(x \mid \mu_i, \sigma_i^2)$,根据

概率密度函数生成服从该分布的 n 个样本(n 应为大样本),将此过程进行 m 次并进行叠加,m 为叠加样本数量,随后将蒙特卡洛叠加数据除以叠加次数 m 后降序排序,并取第 $0.05n$ 个数据点作为 95%分位点特征值。以两子分布组成的高斯混合分布为例进行计算,表 2 为特征加权法与蒙特卡洛抽样结果对比。其中 G1、G2 组为双子分布权重组合不同,其他参数相同的对比情况;G1、G3 组为双子分布均值组合不同,其他参数相同的对比情况;G1、G4 组为双子分布方差组合不同,其他参数相同的对比情况。

表 2　特征加权法计算误差

Table 2　Weighted average method for calculating the error

组别	均值	标准差	权重	子分布特征值	特征加权法特征值	蒙特卡洛特征值	特征加权误差/%
G1	90	4	0.25	89.07	66.36	65.73	−0.95
	60	9	0.75	58.79			
G2	90	4	0.50	89.34	73.93	73.08	−1.16
	60	9	0.50	58.53			
G3	90	4	0.25	89.07	77.61	77.54	−0.09
	75	9	0.75	73.79			
G4	90	9	0.25	87.91	66.07	65.67	−0.59
	60	9	0.75	58.79			
G5	90	9	0.50	88.52	81.02	81.14	0.15
	75	9	0.50	73.52			

由表可知对于不同情况的双子分布,特征加权法的计算误差略有区别,具体而言双子分布均值相差较小时即双峰相距更近时特征加权法误差更小(G1、G3 组),双子分布方差相差较小时特征加权法误差更小(G1、G4 组),双子分布权重更平均(即两个子分布占比更接近)时特征加权法误差更大(G1、G2 组),但特征加权法计算误差均在 2%以内,都可满足工程要求。

3　现场验证

3.1　工程概况

某工程建筑面积约 7 000 m^2,地上三层,主体结构为框架-剪力墙混凝土结构。其中 2 层顶采用无黏结预应力混凝土技术。该工程服役近 30 年后计划加固与改造,需对其有效应力进行评估并计算剩余承载力。混凝土强度等级为 C30,2 层顶的预应力钢绞线布置情况如图 4 所示。

3.2　依据特征值计算的构件承载力

以板内全预应力筋预应力检测数据(92 根)作为总体,将全样本空间有效预应力分布概率密度函数绘制如图 5 所示。可以看出预应力分布呈现较明显的双峰特性。

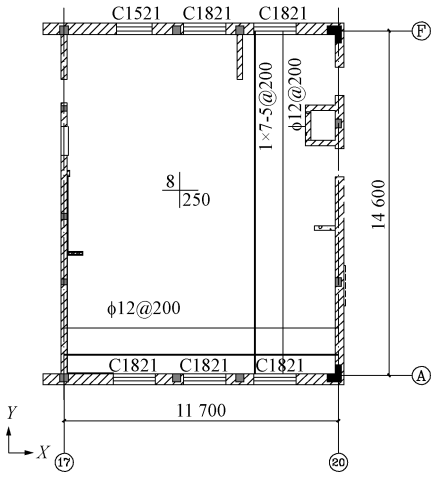


图 4　无黏结预应力板结构平面　mm

Fig. 4　Structure plan of unbonded prestressed slabs

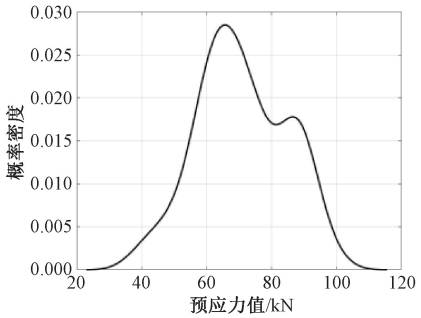


图 5　板内预应力筋预应力检测值分布

Fig. 5　Distribution of prestress detection values of prestressed reinforcement in plate

基于 GB/T 50344—2019《建筑结构检测技术标准》[19]所规定的建议样本量,抽取 20 根预应力筋作为抽样样本,通过蒙特卡洛方法模拟抽样 100 000 次,并基于 EM 算法解构抽样样本,根据式(4)~(8)计算其承载力评价特征值,绘制概率密度如图 6 所示,经正态性检验,结果显示承载力评价特征值可接受正态性假设,计算均值为 68.47 kN,标准差为 1.93,且估计区间为[65.30,71.65]。估计误差在全样本承载力评价特征值±5%的范围以内,可满足工程要求。

在实际工程抽样过程中,抽样样本计算的承载力评价特征值可能落在估计区间内任意一点,在构件性能评价的过程中,总是希望评价结果贴近实际情况的条件下更偏于安全,因此在算例中将抽样样本承载力评价特征值按照估计下限进行考量。据此计算结构承载力结果见表 3。

实际工程荷载由永久荷载与活荷载构成,永久

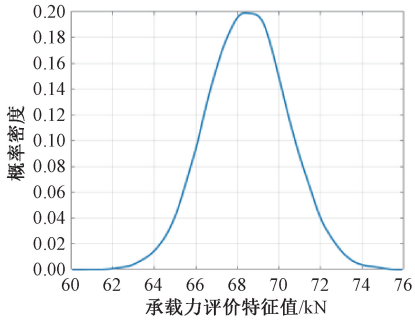


图 6　抽测样本承载力评价特征值分布

Fig. 6　Distribution of characteristic values for evaluating the bearing capacity of samples

表 3　双向板依文献[20]计算承载力

Table 3　Calculated bearing capacity of the bidirectional plate according to literature [20]　kN·m

方向	特征值评价抗弯承载力	设计复核抗弯承载力	均值评价抗弯承载力
X 向	119.45	153.21	136.59
Y 向	106.30	141.69	119.46

荷载由楼板自重与地面做法组成,可变荷载标准值取 $q=2\ \mathrm{kN/m^2}$。按照最不利状态进行考虑,永久荷载与活荷载分项系数分别取 1.2 和 1.4 进行计算。计算结构双向跨中弯矩见表 4。

表 4　双向板在荷载组合条件下跨中弯矩

Table 4　Mid-span bending moments of the bidirectional plate under load combination　kN·m

方向	*X* 向	*Y* 向
弯矩	125.60	74.78

校核显示根据设计值、均值评价结果满足承载力要求,根据特征值评价 *X* 向不满足承载力要求,特征值与其他两种方法的评价结果迥异且偏于安全,由于实际承载力未知,还需对实际承载力进行考量,判断三种方法的准确性。

3.3　不同评价指标仿真模拟分析

由于根据规范 JGJ 92—2004[20]计算构件承载力无法对不同实测单筋数据进行精确考量,故借助有限元方法使用单筋数据进行建模模拟真实情况,分别使用预应力特征值、均值、设计值建模对比真实情况。

采用商用有限元软件 ABAQUS 2019 建立非线性有限元分析模型与 JGJ 92—2004 计算数据进行对比。在模型中选择壳单元 SHELL 模拟预应力混凝土板,有限元模型如图 7 所示,预应力通过等效荷载法[21]进行施加。

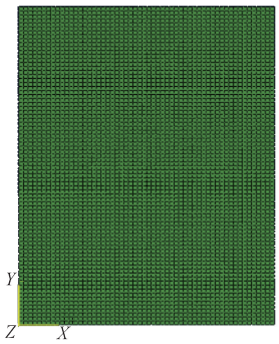


图 7　ABAQUS 有限元模型

Fig. 7　ABAQUS finite element model

为模拟四边简支的边界条件,限制四边的 *Z* 向位移,同时限制一个角点的 *X*、*Y* 向位移和与其相邻角点的 *X* 向位移,在该约束条件下使用等效荷载法模拟预应力需在板边施加轴力、将轴力移至截面形心处产生的弯矩、预应力线型产生的平衡荷载,图 8 为等效荷载法在四边简支约束条件下的加载模型。

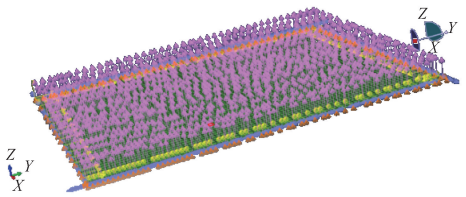


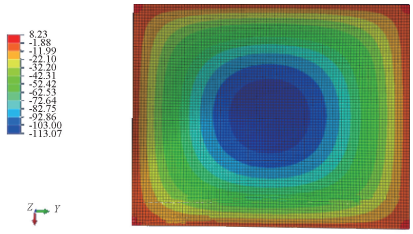
图 8　等效荷载法加载情况

Fig. 8　Equivalent load method loading condition

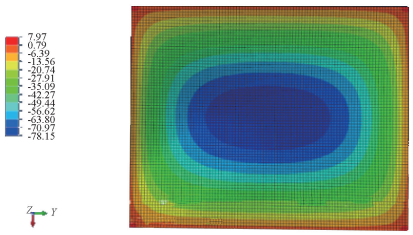
针对预应力混凝土板在荷载标准组合情况下,采用无预应力、预应力特征值、实际预应力分布、设计复核预应力值、预应力均值的加载模式进行对比分析,以未加预应力情况为例,图 9 为未加预应力结构 *X* 向、*Y* 向弯矩云图。

由图可知,板内弯矩由四周向中心规律上升,最大弯矩于板几何中心处取得,由此提取结构双向跨中最大弯矩结果为 *X* 向弯矩 113.07 kN·m,*Y* 向弯矩 78.15 kN·m,与 JGJ 92—2004 计算值相比误差分别为 0.7%与 0.16%,可以认为有限元模拟结果与规范计算结果完全吻合。各工况计算结果如表 5 所示。

在有限元模拟中,等效荷载法无法直接提取结构承载力数值,结构承载力主要由结构次内力及变形参数表征,承载力越大则在相同荷载条件下的次内力与变形越小。由表 5 可知,使用设计复核有效预应力值、有效预应力均值计算的有限元结果与结构实际承载能力相比有较大高估,对结构服役性能



(a) X向



(b) Y向

图 9　双向无预应力板内弯矩　kN·m

Fig. 9　Internal bending moments of the bidirectional unprestressed plate

表 5　有限元计算结果汇总

Table 5　Summary of finite element calculation results

加载模式	跨中弯矩/(kN·m)		挠度/mm
	X 向	Y 向	
规范未加预应力	112.28	77.83	37.40
未加预应力	113.07	78.15	38.01
施加预应力特征值	88.87	60.93	30.51
施加预应力设计值	63.58	44.65	23.15
施加预应力均值	76.71	51.57	26.25
施加实际预应力	87.75	60.26	30.36

评价有误判风险,可能造成严重的工程事故。而使用特征值评价的构件承载力相比实际承载能力偏于安全且与实际情况较为契合。在 3.2 节中依预应力特征值计算的 X 向结构承载力不满足要求,而根据其他两种方法的计算结果显示双向均满足承载力要求,相比特征值评价,此两种评价方法对该工程实际服役状况产生了错判,影响了后续评价加固工作的展开。

4　结　论

从实测有效预应力分布出发,针对不同既有结构的预应力分布复杂情况,验证预应力混凝土结构有效预应力基于高斯混合统一概率模型的总体分布规律,建立了具有普适性的结构评价方法,通过对模型解构处理,提取模型典型特征,提出了根据预应力特征值进行结构评价的工程化手段。通过数值仿真和规范计算分析,验证了所提出方法的有效性。主要研究成果如下:

1)工程实测数据表明,既有预应力混凝土结构的有效预应力分布可由子分布个数为 n 的高斯混合分布表征,当 $n=1$ 时,有效预应力分布为高斯分布。

2)使用期望最大算法(EM 算法)可对高斯混合分布模型进行有效的参数估计,估计参数包括各子分布权重 λ_i、均值 μ_i、标准差 σ_i,对分类后各子分布借助 KS 方法进行高斯显著性检验,结果显示子分布可接受高斯分布假设。

3)提出了应用正态分布叠加原理与特征加权法结合提取 95% 保证率下的构件单筋特征值的计算方法。并使用蒙特卡洛模拟验证了多组混合高斯分布应用特征加权法计算的单筋特征值准确性,得到结论:特征加权法计算混合高斯分布构件单筋特征值误差小于 2%,可有效计算单筋特征值。

4)提出了既有结构依据预应力特征值的结构承载能力评价方法,并通过规范验算与数值仿真计算进行比较分析,验证了相比于设计复核有效预应力值、有效预应力均值计算的构件承载力结果,使用特征值评价的构件承载力相比实际承载能力偏于安全且与实际情况较为契合。

参　考　文　献

[1] BONOPERA M, CHANG K, LEE Z. State-of-the-art review on determining prestress losses in prestressed concrete girders[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20), 7257.

[2] 戎芹, 王旭, 侯晓萌, 等. 预应力混凝土结构钢绞线有效应力测量与评估方法[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8): 176-182.

[3] 施秀山, 杨海洋, 杨文彬. 基于预应力损失对主梁挠度的影响分析[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(5): 129-131.

[4] 赵绪满, 张世辉, 帅一丁. 预应力损失对大跨度混凝土连续梁挠度的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2011(增刊 1): 80-82.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[6] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.

[7] 赵煜, 贺拴海, 李春风, 等. 在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(9): 1271-1275.

[8] 胡少伟, 喻江, 陆俊, 等. 大跨度预应力混凝土空心面板服役性态安全评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 148-155.

[9] 程寿山, 李兴庆, 于刚勤, 等. 预应力连续梁桥预应力损失预测及测试方法研究[J]. 公路交通科技, 2006(增刊 1): 71-73.

[10] 李瑞鸽, 张耀庭, 邹冰川. 基于正交异性材料的预应力梁频率的试验研究[J]. 工程力学, 2008(2): 116-121.

[11] 刘永森. 环孔法测试混凝土工作应力试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[12] 刘志勇.有损伤预应力混凝土 T 梁静载试验和有效预应力检测方法[D].石家庄:石家庄铁道大学,2014.

[13] 许庆,曾滨,徐晓达,等.基于高斯混合模型的混凝土结构预应力分布特征及估计方法[J].建筑结构学报,2022,43(10):60-67.

[14] 王甲春,杨明松,吴鸿枫,等.基于概率分析的普通混凝土抗压强度等级评定[J].厦门理工学院学报,2021,29(1):61-67.

[15] 王浩,牟宗龙,易恩兵,等.基于正态分布置信区间分析法求岩石单轴抗压强度[J].煤炭科学技术,2013,41(4):13-15.

[16] BRIAN L M, YARIV E. An EM algorithm for continuous-time bivariate Markov chains[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2013, 57: 504-517.

[17] 傅旭东,赵善锐.用蒙特卡洛(Monte-Carlo)方法计算岩土工程的可靠度指标[J].西南交通大学学报,1996(2):164-168.

[18] 王景梅,肖芳,陈家俊,等.基于贝叶斯理论和蒙特卡洛模拟的桩基可靠度分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):85-90.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构检测技术标准:GB/T 50344—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[20] 中华人民共和国建设部.无粘结预应力混凝土结构技术规程:JGJ 92—2004 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

[21] 扎卡里(Mahamadou Djibo Zakari). 预应力混凝土结构承载能力计算的等效荷载法[D].南京:东南大学,2021.