



T/CECSxxxx-20xx

中国工程建设标准化协会标准

预应力结构诊治技术规程

Technical specification for inspection, appraisal and strengthening
of prestressed structures

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

预应力结构诊治技术规程

Technical specification for inspection, appraisal and strengthening
of prestressed structures

主编单位：xxxxx

批准部门：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年X月X日

中国计划出版社
202X 北京

前言

根据中国工程建设标准化协会文件《关于印发<2019 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2019]012 号）的要求，规程编制组经过深入调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 8 章和 5 个附录，主要技术内容包括：总则；术语和符号；基本规定；预应力混凝土结构检测；预应力钢结构检测；结构验算与鉴定评级；预应力混凝土结构改造与加固；预应力钢结构加固改造与性能提升等。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会预应力专业委员会归口管理，由中冶建筑研究总院有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在使用中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市海淀区西土城路 33 号，邮编：100088），以供修订时参考。

本规程主编单位：

本规程参编单位：

本标准主要起草人员：

目次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	3
3.1 一般规定	3
3.2 检测鉴定	4
3.3 检测方法和抽样方法	6
3.4 改造与加固	8
4 预应力混凝土结构检测	10
4.1 一般规定	10
4.2 材料检测	10
4.3 尺寸偏差检测	11
4.4 构件缺陷检测	12
4.5 配筋和锚具检测	14
4.6 预应力值检测	15
4.7 构件性能检测	16
5 预应力钢结构检测	18
5.1 一般规定	18
5.2 材料检测	18
5.3 尺寸偏差与变形检测	19
5.4 构件缺陷检测	20
5.5 连接检测	21
5.6 索力检测	23
5.7 构件性能检测	25
6 预应力结构鉴定	27
6.1 一般规定	27
6.2 预应力混凝土结构构件验算	29
6.3 预应力钢结构构件验算	31
6.4 预应力结构构件鉴定	31
7 预应力混凝土结构改造和加固	34
7.1 一般规定	34
7.2 预应力混凝土结构改造	34
7.3 预应力混凝土构件加固	36
8 预应力钢结构改造与加固	38
8.1 一般规定	38
8.2 连接加固	38
8.3 预应力钢结构构件加固	41
8.4 预应力钢结构抗连续倒塌	43
附录 A 拉脱法测定有效预应力值	44
附录 B 混凝土应力释放法测定有效预应力值	46
附录 C 预应力钢结构性能动力检测	48
附录 D 预应力钢结构自振频率检测评定	50
本规程用词说明	51
引用标准名录	52

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms.....	2
3	Basic requirements.....	3
	3.1 General requirements.....	3
	3.2 Inspection and appraisal.....	4
	3.3 Inspection method and sampling scheme.....	6
	3.4 Retrofitting alteration and strengthening.....	8
4	Inspection of prestressed concrete structure.....	10
	4.1 General requirements.....	10
	4.2 Inspection for materials	10
	4.3 Inspection for dimension deviation.....	10
	4.4 Inspection for defects in structural member.....	12
	4.5 Inspection for reinforcing steel and anchorage	14
	4.6 Inspection for prestressing.....	15
	4.7 Inspection for structural properties.....	16
5	Inspection of prestressed steel structure	18
	5.1 General requirements.....	18
	5.2 Inspection for materials	18
	5.3 Inspection for dimension deviation.....	19
	5.4 Inspection for defects in structural member.....	20
	5.5 Inspection for connection.....	21
	5.6 Inspection for cable force.....	23
	5.7 Inspection for structural properties	25
6	Appraisal of structure.....	27
	6.1 General requirements.....	27
	6.2 Structure checking for prestressed concrete structure.....	29
	6.3 Structure checking for prestressed steel structure.....	31
	6.4 Appraisal of prestressed structures.....	31
7	Retrofitting alteration and strengthening for prestressed concrete structure.....	34
	7.1 General requirements.....	34
	7.2 Retrofitting alteration for prestressed concrete structure	34
	7.3 Strengthening for prestressed concrete structure	36
8	Strengthening for prestressed concrete structure.....	38
	8.1 General requirements.....	38
	8.2 Strengthening for connection.....	38
	8.3 Reinforcement of prestressed steel structural members.....	41
	8.4 Resisting progressive collapse of Prestressed steel structures.....	43
	Appendix A Inspection for effective prestressing based on lift-off method.....	45
	Appendix B Inspection for effective prestressing based on stress release method.....	47
	Appendix C Structural performance testing and inspection and dynamic testing.....	49
	Appendix D Detection of natural vibration frequency of prestressed steel structure.....	51
	Explanation of wording in this specification.....	52
	List of quoted standards.....	53

1 总则

1.0.1 为在既有预应力结构诊治过程中，做到技术可靠、安全适用、经济合理、确保质量，制定本标准。

1.0.2 本规程适用于既有工业与民用建筑、桥梁及各类构筑物预应力混凝土结构、预应力钢结构的检测、鉴定、加固与改造。

1.0.3 预应力结构的检测、鉴定、加固与改造，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】预应力技术以节材、大跨等显著优势，广泛应用于工业与民用建筑、公铁桥梁和构筑物等各类土木工程。预应力结构的检测、鉴定、加固与改造，除应符合本规程相关规定外，尚应根据结构类别、使用环境和荷载条件等，符合相应的现行国家或行业标准的有关规定。

例如，除应符合本规程外，预应力结构的检测应按照现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB 50344 等标准，预应力建筑结构结构的鉴定应符合《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144 或《民用建筑可靠性鉴定标准》GB50292。预应力公路、铁路桥梁的检测和鉴定，尚应符合《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99 或《城市桥梁检测与技术评定技术规范》CJJ/T 233 等现行行业的相关标准。预应力混凝土安全壳结构的检测鉴定尚应符合《核电厂构筑物维护及可靠性鉴定标准》GB 51323 进行鉴定。

2 术语

2.0.1 预应力结构 prestressed structure

配置受力的预应力筋，通过张拉或其他方法建立预加应力的结构，可分为预应力混凝土结构和预应力钢结构。

2.0.2 预应力结构诊治 evaluation and strengthening of prestressed structure

预应力结构诊治是指预应力结构检测、鉴定、改造及加固等四项工作。

2.0.3 预应力效应 prestress effect

预应力效应主要指结构在预应力作用下的变形、内力和裂缝等。

2.0.4 拉脱法 inverse tensioning method

拉脱法是指通过千斤顶张拉预应力筋端部，以锚具脱离承压板时的张拉力值为预应力值的检测方法。

2.0.5 应力释放法 stress free method

应力释放法是指利用机械对预应力混凝土构件所测应力区进行切割或钻孔，使该部位的应力被释放，测量应力释放前后的应变变化，再经过换算得到预应力值的检测方法。

2.0.6 预应力结构改造 retrofitting alteration of prestressed structure

由于改变建筑用途、性能或结构布置，而对预应力结构进行的局部改变、构件增减、预应力筋切断及重新锚固等。

2.0.7 预应力结构加固 strengthening of prestressed structure

对可靠性不足或产权人要求提高可靠度的预应力结构，通过采取局部增强或调整内力等措施，使其满足现有可靠性要求或产权人要求的安全性、适用性和耐久性的。

2.0.8 连续倒塌 progressive collapse

结构因偶然荷载造成结构局部破坏失效，继而引起失效破坏构件相连的构件连续破坏，最终导致相对于初始局部破坏更大范围的倒塌破坏。

2.0.9 预应力结构检测 inspection of prestressed structure

为评定预应力结构工程质量或鉴定既有预应力结构的安全性、使用性或抗灾害能力提供数据所实施的现场检测。

2.0.10 预应力结构鉴定 appraisal of prestressed structure

根据现场检测结果，结合计算、分析，对预应力结构的可靠性等级进行评定。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 预应力结构诊治包括预应力结构检测、鉴定、改造及加固等四项工作，当预应力结构需要诊治时，其所有权单位应根据诊治内容按本规程有关要求进行治疗。

【条文说明】 预应力结构使用和维保过程中有其特殊性，结合其使用特征，一般由所有权单位组织或委托有关单位组织，定期或特定条件下进行结构的检测与鉴定，改造加固是基于检测鉴定结构及功能改变需求进行实施。

3.1.2 当既有预应力结构存在下列情况时，应进行检测、鉴定：

- 1 存在的质量缺陷或出现的腐蚀、损伤、变形等影响安全时；
- 2 达到设计使用年限拟继续使用时；
- 3 使用条件或使用环境改变对安全性不利时；
- 4 结构改变用途、改造或扩建前的评定；
- 5 需要进行全面大修时；
- 6 遭受灾害或事故后，拟继续使用时；
- 7 日常维护检查发现有安全隐患时；
- 8 当对结构有效预应力值存在疑义时；
- 9 发现紧急情况或有特殊问题的评定。

3.1.3 预应力结构应根据检测鉴定目的、结构类型和受力特征等确定的检测鉴定范围，检测鉴定范围应包括下列内容：

- 1 预应力构件；
- 2 预应力影响范围内的非预应力构件及连接；
- 3 预应力结构体系。

【条文说明】 通常结构中，预应力构件由于预应力效应的存在，会对其周围的非预应力结构产生影响。因此，在检测鉴定时，需要考虑预应力效应影响范围内非预应力构件。

3.1.4 当既有预应力结构经鉴定不满足可靠性要求时，应根据有效预应力值、结构损伤程度、加固难度、加固后结构安全等级以及加固费用等，综合给出加固处理或拆除重建的评估意见。

【条文说明】 预应力结构经鉴定需要加固时，应根据鉴定结论和委托方提出的要求，由专业技术人员按本规程及国家现行标准的相关要求进行加固设计。加固设计的内容和范围，

可以是结构整体，亦可以是指定的区段、特定的构件或部位。加固后的预应力结构的安全等级应根据结构破坏后果的严重程度、结构的重要性和下一个使用期的具体要求，由委托方和设计者按实际情况商定。

3.2 检测鉴定

3.2.1 既有预应力结构的检测鉴定，应按图 3.2.1 规定的检测鉴定程序进行。

【条文说明】本规程制定的鉴定程序是一种常规的鉴定的工作程序，是根据大量的预应力结构检测、鉴定的实践经验，并参考其他相关标准制定的。执行时，可根据鉴定的具体要求进行安排。如遇到简单问题时，可适当简化；如遇到特殊问题时，可进行必要的补充和调整。

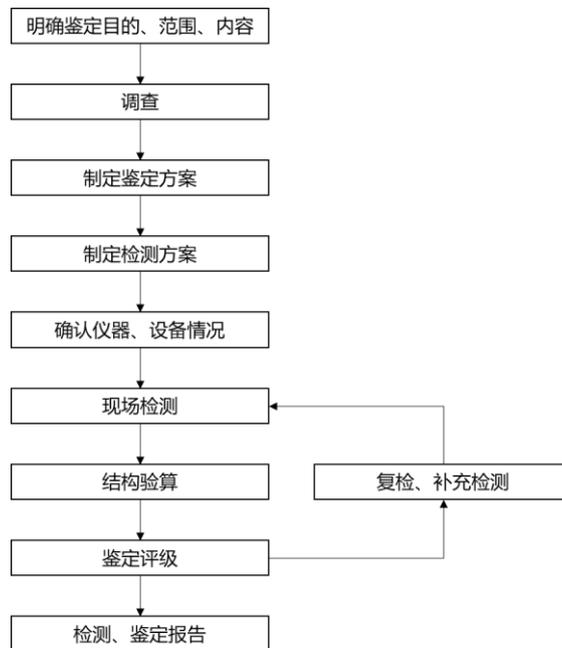


图 3.2.1 检测鉴定程序

3.2.2 检测鉴定的调查宜包括下列基本内容：

1 查阅图纸、资料，包括预应力专项施工方案、预应力张拉记录、竣工图、竣工验收资料、检查观测记录、维修记录、历次鉴定加固和改造图纸和资料、事故处理报告等；

2 调查预应力结构的历史情况，包括施工、维修、加固、改造、用途变更、使用条件改变以及受灾害等情况；

3 考察现场，调查预应力结构的基本情况、实际状况、使用条件、内外环境、事故记录，查看目前已发现的问题，调查或听取有关人员的意见等。

【条文说明】结构检测前的资料调查和现场调查非常重要。收集有关资料 and 了解结构的状

况，不仅有利于制定检测方案，而且有助于确定检测的项目和重点。

3.2.3 预应力结构检测鉴定方案应根据检测鉴定对象的特点和调查结果、检测鉴定目的和要求制订，并应征求委托方的意见。

【条文说明】 预应力结构检测鉴定方案应根据委托方提出的检测鉴定原因和要求以及结构的现状进行确定。

3.2.4 预应力结构的检测方案宜包括下列主要内容：

- 1 工程概况或结构概况；
- 2 检测目的或委托方的检测要求；
- 3 检测依据；
- 4 检测项目，选用的检测方法和检测的数量；
- 5 检测人员和仪器设备；
- 6 检测工作进度计划；
- 7 所需要的配合工作；
- 8 检测中的安全措施和环保措施。

3.2.5 预应力结构检测宜根据工程实际情况选择下列内容：

- 1 材料性能检测；
- 2 预应力锚固系统检查、检测；
- 3 有效预应力值检查、检测；
- 4 预应力结构使用性能检测分析。

【条文说明】 现场检查与检测工作，是获得预应力结构现状必要资料、可靠数据的关键，也是进行下一步可靠性分析与验算的基础。具体到每一个鉴定的项目需要做哪些工作，还需要根据实际所遇到的问题进行必要的选择。

3.2.6 预应力结构的可靠性鉴定应包括安全性和使用性鉴定，鉴定评级应符合本规程及国家现行标准的相关规定。

【条文说明】 预应力结构的安全性分析应在考虑所存在的预应力现状、构件缺陷、材料腐蚀和损伤等问题的基础上进行结构承载力分析与验算。预应力结构的可靠性鉴定评级根据结构特点可划分为构件、结构系统、鉴定单元三个层次，结构系统和鉴定单元的鉴定评级可参照《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144，《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 进行评定安全性等级和使用性等级评定。预应力桥梁系统的可靠性鉴定评级可参照《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99 进行评定。核电厂安全壳系统可按照《核电厂建构筑物维护及可

可靠性鉴定标准》GB 51323 进行评定。

3.2.7 在预应力结构可靠性鉴定中，当发现检查或检测资料不足或不准确时，应及时进行补充检查或检测。

【条文说明】 可靠性鉴定过程中，若鉴定分析所需要的数据不足或不准确时，应进行补充或扩大检测，以补足所需要的计算数据。

3.3 检测方法和抽样方法

3.3.1 预应力结构的检测，应根据检测目的、结构状况和现场条件选择适宜的检测方法。

【条文说明】 本条规定了选取检测方法的基本原则，主要强调检测方法的适用性问题。本条所列方法可以单独使用也可综合使用。

3.3.2 预应力结构的检测，可选用下列检测方法：

- 1 标准规定或建议的检测方法；
- 2 在相应标准规定的基础上扩大其适用范围的检测方法；
- 3 检测单位自行开发或引进的检测方法。

【条文说明】 本条规定的目的是鼓励采用先进的检测方法、开发新的检测技术和使检测方法标准化。本条的规定仅限于既有结构性能的检测，且检测和评定都由一个单位完成。这样可以避免出现不可靠的检测结论。

3.3.3 采用标准规定或建议的检测方法时，应遵守下列规定：

- 1 检测方法有相应的检测标准时，应按检测标准规定执行；
- 2 检测方法没有相应的检测标准时，检测单位应有相应的检测细则；检测细则应对检测用仪器设备、操作要求、数据处理等作用规定。

3.3.4 采用扩大相应检测标准使用范围的检测方法时，应遵守下列规定：

- 1 所检测项目的目的与相应检测标准相同；
- 2 检测对象的性质与相应检测标准检测对象的性质相近；
- 3 应采取有效的措施，消除因检测对象性质差异而存在的检测误差；
- 4 检测单位应有相应的检测的细则，在检测方案中应予以说明，必要时应向委托方提供检测细则。

3.3.5 采用检测单位自行开发或引进的检测方法时，应符合下列规定：

- 1 该方法应通过技术鉴定；

- 2 该方法应已与成熟的方法进行比对试验；
- 3 检测单位应有相应的检测细则，并提供测试误差或测试结果的不确定度；
- 4 在检测方案中应予以说明并经委托方同意。

【条文说明】把成熟的试验方法用于现场的取样检测是行业内的共识，条件是取样试件与标准试件基本一致。

3.3.6 结构现场检测可采取全数检测或抽样检测两种检测方式。抽样检测时，宜随机抽取样本。当不具备随机抽样条件时，可按约定方法抽取样本。

【条文说明】 预应力结构检测宜根据委托方的要求、检测项目的特点确定检测的数量。

3.3.7 遇到下列情况时宜采用全数检测方式：

- 1 外观缺陷或表面损伤的检查；
- 2 受检范围较小或构件数量较少；
- 3 检验指标或参数变异性大或构件状况差异较大；
- 4 灾害发生后对结构受损情况的外观检查；
- 5 需减少结构的处理费用或处理范围；
- 6 委托方要求进行全数检测。

【条文说明】本条提出了采用全数检测方式的适用情况。所谓全数检测并不意味对整个工程的全部构件(区域)进行检测，全数对应于检验批内的全部构件(区域)，当检验批缩小至单个构件时，全数对应于该构件可布置的测区。

3.3.8 其他可采用抽样方式进行检测，可根据检测项目的实际情况采取计数抽样方法、计量抽样方法或分层计量抽样方法进行检测；抽样数量应根据结构类型的不同参考相关国家现行标准进行确定。

3.3.9 符合正态分布的性能参数可对该参数总体特征值或总体均值进行推定，推定时应提供被推定值的推定区间，标准差未知时计量抽样和分层计量抽样的推定区间限值系数可按国家现行标准《正态分布分位数与变异系数的置信限》GB/T 10094 的规定确定。

【条文说明】国家现行标准《正态分布分位数与变异系数的置信限》GB/T 10094 提供了根据样本容量及给定置信水平，确定分位数置信区间的方法，推定区间的置信度宜为 0.90，并使错判概率和漏判概率均为 0.05。特殊情况下，推定区间的置信度可为 0.85，使漏判概率为 0.10，错判概率仍为 0.05。推定区间可按下列公式计算：

- 1 检验批标准差未知时，总体均值的推定区间应按下列公式计算：

$$\mu_u = m + k_{0.5} s \quad (3.3.10-1)$$

$$\mu_l = m - k_{0.5} s \quad (3.3.10-2)$$

式中： μ_u ——均值推定区间的上限值；

μ_l ——均值推定区间的下限值；

m ——样本均值；

s ——样本标准差；

$k_{0.5}$ ——0.5分位值标准差未知时推定区间上限值与下限值系数

2 检验批标准差为未知时，计量抽样检验批具有 95%保证率特征值的推定区间上限值和下限值可按下列公式计算：

$$x_{0.05,u} = m - k_{0.05,u} s \quad (3.3.10-3)$$

$$x_{0.05,l} = m - k_{0.05,l} s \quad (3.3.10-4)$$

式中： $x_{0.05,u}$ ——特征值推定区间的上限值；

$x_{0.05,l}$ ——特征值推定区间的下限值。

根据抽样检测的理论，随机抽样不能得到被推定参数的准确数值，只能得到被推定参数的估计值，因此推定结果应该是一个区间。由于只定义了合格质量水平，未定义极限质量水平，本条中的错判概率和漏判概率不能完全等同于生产方风险和用户方风险。

对计量抽样检测结果推定区间上限值与下限值之差值宜进行控制。在置信度相同的前提下，推定区间越小，推定结果的不确定性越小。样本的标准差 s 和样本容量 n 决定了推定区间的大小，因此减小样本的标准差 s 或增加样本的容量 n 是减小检测结果不确定性的措施。对于无损检测方法来说，增加样本容量相对容易实现，对于局部破损的取样检测方法和原位检测方法来说，增加样本容量相对难于实现。对于后者来说，减小测试误差更为重要。

3.4 改造与加固

3.4.1 预应力结构的改造与加固应根据可靠性鉴定结论和委托方提出的要求进行。

【条文说明】 加固设计的范围，可按预应力结构整体或其中某独立区段确定，也可按指定的结构、构件或连接确定，但均应考虑该结构的整体牢固性。众多的工程实践经验表明，承重结构的加固效果，除了与其所采用的方法有关外，还与预应力结构现状有着密切的关系。一般而言，结构经局部加固后，虽然能提高被加固构件的安全性，但这并不意味着该承重结构的整体承载便一定是安全的。因为就整个结构而言，其安全性还取决于原结构方案及其布置是否合理，构件之间的连接、拉结是否系统而可靠，其原有的构造措施是否得

当与有效等，而这些就是结构整体牢固性的内涵，其所起到的综合作用就是使结构具有足够的延性和冗余度。因此，本规范要求专业技术人员在承担结构加固设计时，应对该承重结构的整体牢固性进行检查与评估，以确定是否需作相应的加强。

3.4.2 预应力结构的改造与加固的设计使用年限，应由业主和设计单位共同商定，不宜低于主体结构后续设计使用年限。当为局部加固时，尚应考虑原主体结构剩余设计使用年限对结构加固设计使用年限的影响。

【条文说明】 结构加固的设计使用年限，应与结构加固后的使用状态及其维护制度相联系，否则是无法确定的。因此，本规范给出的是在正常使用与定期维护条件下的设计使用年限，至于其他使用条件下的设计使用年限，应由专门技术规程做出规定。

3.4.3 改造与加固后预应力结构的安全等级，应根据结构破坏后果的严重性、结构的重要性和加固设计使用年限，由委托方与设计方按实际情况共同商定。

【条文说明】 被加固的结构、构件，其加固前的服役时间各不相同，其加固后的结构使用功能又可能有所改变，因此不能直接沿用原设计的安全等级作为加固后的安全等级，而应根据委托方对该结构下一目标使用期的要求，以及该结构加固后的用途和重要性重新进行定位，故有必要由委托方与设计单位共同商定。

3.4.4 预应力结构的加固与改造设计应符合下列规定：

- 1 应根据现场条件对施工方法、加固效果的影响确定设计方案；
- 2 加固件应与原结构协调工作；
- 3 对于由不同影响因素引起的结构损伤，应在加固设计中提出相应的治理措施；
- 4 并应避免对未加固部分造成不利的影晌。
- 5 预应力结构的改造与加固工程的施工验收应执行现行国家标准的相关规定。

【条文说明】 3 对于由不同影响因素引起的结构损伤，首先应在加固时采取有效的防治对策，从源头上消除其有害作用，一般而言是先治理后加固，但也有一些防治措施可能需在加固后采取。因此，在加固设计时，应合理安排好治理与加固的工作顺序，以使这些有害因素不至于复发。

4 预应力混凝土结构检测

4.1 一般规定

4.1.1 预应力混凝土结构的检测主要包括材料性能、构件几何参数与缺陷、预应力效应等分项，必要时，可进行结构性能的静载试验或结构的动力测试。

【条文说明】预应力混凝土结构包括工业与民用预应力混凝土结构、公路铁路预应力混凝土梁桥、预应力混凝土安全壳结构等。本条提出了预应力结构的检测工作。具体实施的检测工作和检测项目应根据委托方的要求、预应力混凝土结构的实际情况等确定。

4.1.2 混凝土强度、钢筋配置等混凝土结构共性项目应按现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784 等相关规定进行检测和评定。

4.1.3 当需要采用破损的方法对预应力混凝土构件性能进行检测时，宜按下列原则进行：

1 当需采用取样法进行检验时，可选取与预应力混凝土构件材料同批、同等级的非预应力构件进行取样检测，依据检测结果对预应力混凝土构件性能进行推定。

2 当结构体系中包含预应力梁、预应力板结构时，宜选取预应力混凝土板中预应力筋进行取样检测，依据预应力混凝土板的检测结果对预应力混凝土梁性能进行推定。

3 当结构体系中只含有预应力梁时，必要时可对梁内预应力筋进行取样检验，选取位置宜选在在应力较小的部位，试件的长度应满足力学性能试验方法的要求。

4 当必须进行预应力筋现场取样时，取样时应采取安全保护措施并对结构安全性进行验算，取样位置及方案应经过结构工程师确认。

【条文说明】预应力混凝土结构具有高应力特征，预应力筋一旦断裂释放冲击强、安全风险大，原则上宜采用无损检测的方法对构件性能进行检测。当必须采用破损的方法进行检测时，可采用周边的非预应力构件性能的检测结果对预应力构件进行推断，或选取一般性预应力构件进行检测以减少破损检测对构件的影响。当需要采用破损法对结构重要预应力构件进行检测时，应首先征求结构工程师的意见，采用安全保护措施后，方可进行检测。采用局部破损的原位检测方法时，不对结构或构件的性能造成明显的影响。在现场取样后，应对结构构件受损部位进行修复。

4.2 材料检测

4.2.1 预应力混凝土结构中的混凝土材料质量、力学性能、耐久性能应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的相关要求，检测方法应按照现行国家标准《混凝土结

构现场检测技术标准》GB/T 50784 要求进行。

【条文说明】混凝土力学性能检测包括混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、混凝土静力受压弹性模量，耐久性的检测主要包括混凝土的抗渗性、抗冻性、氯离子渗透性能、抗硫酸盐侵蚀性能。检测抽样方法和检验操作都应该执行国家现行有关标准的规定。

4.2.2 预应力混凝土结构中的普通钢筋材料性能应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢》GB 1499 相关要求。

【条文说明】当缺乏钢筋进场抽验试验报告、缺乏相关设计资料或对钢筋的力学性能存在怀疑时，应对钢筋的力学性能进行检验。混凝土中钢筋的力学性能应采用直接截取钢筋进行检测，截取钢筋时应采取必要措施，确保受检构件和结构的安全，钢筋截取位置宜选在在应力较小的部位，钢筋试件的长度应满足钢筋力学性能试验方法的要求。为保障结构的安全，取样方案、保护措施和修复方案应由结构工程师进行确认。

4.2.3 预应力混凝土结构中预应力筋材料性能应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010。当委托方有特殊要求需现场取样检验时，应采取安全措施释放预应力筋内的预应力，并按照现行国家标准《预应力混凝土用钢材试验方法》GB/T 21839 的规定进行检验。

4.3 尺寸偏差检测

4.3.1 预应力混凝土构件的尺寸偏差检测应包括下列内容：

- 1 构件截面尺寸；
- 2 标高；
- 3 轴线尺寸；
- 4 构件垂直度；
- 5 表面平整度；
- 6 构件变形。

【条文说明】本条规定了预应力混凝土构件的尺寸偏差检测的主要内容。

4.3.2 预应力混凝土构件的尺寸应以照设计图纸的尺寸为基准确定尺寸偏差，尺寸的检测方法和尺寸偏差的允许值应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

【条文说明】预应力混凝土结构几何尺寸检验构件的选取应均匀分布，抽取构件数量的 1% 进行检验，且不应少于 3 个构件。检测构件几何尺寸时，应采取措施消除构件表面抹灰层、装修层等造成的影响。

4.3.3 预应力混凝土结构的变形检测内容包括构件的倾斜、挠度、反拱度等，检测方法应符合下列要求：

1 构件的倾斜可采用经纬仪、激光准直仪或吊锤的方法检测，检测方法应符合现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784 的规定。

2 预应力构件挠度和反拱度可采用水准仪或拉线的方法进行检测，检测时应考虑施工误差及尺寸变化造成的影响，可沿跨度方向等间距布置若干测点，绘制受检构件的挠度或反拱曲线。

3 对于永久荷载较小预应力混凝土构件，应重点检测其反拱度。

【条文说明】本条提出了构件尺寸偏差与变形的主要检测项目。

1. 预应力混凝土结构的变形检测内容包括构件的挠度、倾斜、反拱度等工作。检验批的划分、抽样方法及判别规则应符合现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的有关规定。检测构件几何尺寸时，应采取措施消除构件表面抹灰层、装修层等造成的影响。

2. 构件的挠度可采用水准仪或者拉线的方法进行检测。宜对受检范围内存在挠度变形的构件进行全数检测，当不具备全数检测条件时，可根据考虑重要的构件和最不利状况的原则进行抽样检验。

3. 预应力混凝土受弯构件的反拱是由预加应力引起的，预应力张拉是由于混凝土受到偏心压缩，导致跨中截面下边缘受压，上边缘受拉，梁向上拱起与荷载引起的向下挠度方向相反，故称作反拱度。预应力的反拱值的变化是一个长期的过程，需根据工程需要进行定期观测。

4.3.4 对于受到环境侵蚀和灾害影响的预应力混凝土构件，应选取损伤严重部位进行尺寸测量。

4.4 构件缺陷检测

4.4.1 预应力混凝土构件外观质量与缺陷检测应符合下列规定：

1 预应力混凝土构件外观质量与缺陷的检测内容可分为混凝土外部缺陷、内部缺陷、波纹管内灌浆质量等工作。

2 预应力混凝土构件外观缺陷可采用目测与尺量的检测方法进行，评定方法应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

3 预应力混凝土裂缝的检测及评定方法应符合国家现行标准《建筑结构检测技术标准》

GB/T 50344、《城市桥梁检测与评定技术规范》CJJ/T233 或《核电厂构筑物维护及可靠性鉴定标准》GB 51323 的规定。

4 预应力混凝土结构内部缺陷的检测，可采用超声法、冲击反射法等无损检测方法，必要时应采用局部破损方法对无损检测结果进行验证。超声法检测应按国家现行标准《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21 的规定进行。

5 当对波纹管内灌浆质量有异议时，可采用冲击回波法、超声法等无损方法进行检测，并可采用局部破损方法对无损检测结果进行验证。冲击回波法应符合国家现行标准《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》JGJ/T 411 的规定。

【条文说明】本条列举了常见的预应力混凝土构件外观质量与缺陷的检测项目。

1. 预应力混凝土构件外观缺陷可分为露筋、蜂窝、孔洞、夹渣、疏松、裂缝、混凝土的结合面等。预应力混凝土构件内部缺陷主要包括不可见的孔洞、疏松、不良结合面等。波纹管内灌浆质量缺陷主要为灌浆不密实，甚至产生大面积孔洞。缺陷虽然是在结构工程施工时形成的，既有结构也要对缺陷进行检测。

2. 现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 规定了外观缺陷的检测方法。这些检测方法均属于直接方法，可用于结构工程质量检测和既有结构性能检测。委托方有要求时，可通过剔凿、成孔等方法确定外观缺陷的深度。

3. 预应力结构及构件按期活动性质可分为稳定裂缝、准稳定裂缝和不稳定裂缝。在裂缝检测时需判断裂缝成因、裂缝的稳定状态等，必要时应对裂缝进行观测。裂缝的检测方法如下。

1) 检测项目应包括裂缝的位置、长度、宽度、深度、分布和数量，应采用表格和图形进行记录。

2) 裂缝深度可采用超声法检测，必要时应采用钻芯取样法进行检测。

3) 仍在发展的裂缝应进行定期观测和记录。

4. 现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB / T 50784 规定了超声波法和电磁波反射法的检测方法。混凝土为非匀质材料，不同品种和强度的混凝土内各种波的传播速度并不是恒定值。在进行了间接方法测试后，为了保证定位准确，应采用局部钻孔、取芯或开凿的直接方法对内部缺陷进行确认。

5. 冲击回波法是利用瞬态激励（用一个小钢球或小锤轻敲结构表面）产生的低频应力波在混凝土结构内部传播，遇到结构缺陷或边界时反射回来，通过加速度传感器或声波传感器记录信号、进行信号分析（频谱分析）来确定结构内部是否存在缺陷，并识别出缺陷

的大致位置及缺陷的定性分析。现行行业标准《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》JGJ / T 411 规定了冲击回波法的检测方法。

4.4.2 预应力筋腐蚀与涂装保护的检测应符合下列规定：

1 对于有粘结预应力筋，其腐蚀可采用自然电位法、电阻法等方法进行检测，电位法检测应符合现行行业标准《混凝土中钢筋检测技术规程》JGJ/T 152 的有关规定，必要时可采用局部凿除或钻孔方法检测锚固体锈蚀状态、预应力钢绞线或精轧螺纹钢锈蚀状态。

2 对于无粘结预应力钢绞线，应进行防腐润滑脂量、缓粘结剂和护套厚度的检验，检验结果应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG 161 的相关规定。

3 对于缓粘结预应力钢绞线，应进行缓粘结剂和护套厚度的检验，检验结果应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 的相关规定。

【条文说明】当预应力钢筋具有较强的拉应力时,其在电化学方面要比无应力或低应力的钢筋活跃很多。如果预应力钢筋因氯离子的侵蚀等出现局部锈蚀,形成锈蚀坑,则在锈蚀坑的根部会形成明显的应力集中现象。对于低韧性的高强钢筋而言,腐蚀坑根部的应力峰很难被塑性变形所消除,往往会在应力集中区的薄弱部位造成微裂缝。在腐蚀介质和高应力的共同作用下,微裂缝会逐步扩展,直至钢筋截面达到临界尺寸而突然断裂。应力腐蚀破坏是一种非常危险的破坏现象,破坏前没有混凝土开裂、构件下挠等预兆,具有很大的突然性,其破坏后果往往很严重。本条提出了预应力筋腐蚀与涂装保护的检测项目。

1. 钢筋锈蚀状况不具备批量检测的条件,宜在对使用环境和结构现状进行调查并分类的基础上,选取使用环境恶劣、外观损伤严重的区域或关键构件进行检测。现行行业标准《混凝土中钢筋检测技术规程》JGJ/T 152 规定了钢筋锈蚀检测方法。预应力筋作为一种具有高应力的钢筋,可以采用半电池电位法来定性评估预应力钢筋锈蚀性状,必要时宜进行剔凿实测验证。

2. 无粘结预应力筋应进行采用剔凿法直接对其涂装保护质量检验,其防腐润滑脂量和护套厚度应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG 161 的相关规定。

4.5 配筋和锚具检测

4.5.1 预应力混凝土构件中预应力筋配置和锚具的检测,可采取剔凿法进行检测,检测方法应符合下列规定:

1 剔除构件锚具周边混凝土,露出锚具;

2 检测锚具中预应力筋的数量。

3 检测锚具外观尺寸和锈蚀程度。

【条文说明】 预应力筋用锚具、夹具和连接器的检测分为外观尺寸检测和锈蚀检测，尺寸应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接》GB/T 14370 的有关规定。

4.5.2 预应力混凝土构件中普通钢筋数量和间距可采用钢筋探测仪进行检测，必要时可采用剔凿法进行验证。仪器性能和操作要求应符合现行行业标准《混凝土中钢筋检测规程》JGJ/T 152 的有关规定。

【条文说明】 采用钢筋探测仪和雷达仪检测钢筋数量和间距，其精度可以满足要求。由于电磁屏蔽作用，当多层配筋时，钢筋探测仪和雷达仪难以测定内层钢筋；当钢筋间距较小时，还可能会出现漏检的情况。

4.6 预应力值检测

4.6.1 无粘结预应力混凝土结构预应力效应可采用拉脱法进行推定。采用拉脱法推定结构有效应力时，可按本规程附录 A 执行。

【条文说明】 拉脱法是对预应力结构外露部分的预应力筋进行反拉，通过分析张拉过程中预应力筋的荷载-应变曲线来反映预应力筋的应力大小。

4.6.2 有粘结预应力结构预应力效应检测，可采用应力释放法。采用应力释放法推定结构有效应力时，可按本规程附录 B 执行。

【条文说明】 应力释放法是指对预应力筋事先进行人为的局部损伤，通过分析由设备检测到的损伤部位附近应力或应变数据，从而获知预应力筋的工作应力状态，应力释放法可根据在预应力筋上的损伤形式又可细分为剥层法、套孔法、钻孔法、盲孔法、开槽法和 SSRHT 检测法。

4.6.3 当剔除混凝土后露出预应力筋时，可采用弓式测力法对预应力筋有效应力进行测量。其有效应力可按下式计算：

$$T = P \times l / (4\delta) \quad (4.6.3)$$

式中：T——有效预应力值(N)；

P——弓式测力仪测量时施加的横向推力(N)；

l——测力计支承长度(mm)；

δ——预应力筋横向相对变形量(mm)。

4.6.4 基于检测数据对结构的有效预应力值进行推定时，应考虑结构有效预应力值不确定性和不均匀性的影响。

【条文说明】预应力筋在张拉与服役过程中，受材料、施工、设计等参数随机性的影响，使其真实有效应力存在不确定性。此外，结构预应力体系是由多根预应力筋共同组成，受长度、配筋率、混凝土截面面积等设计因素的影响，不同位置预应力筋的预应力损失程度并不相同，其有效应力分布呈现一定的不均匀特性。在采用检测数据对结果有效应力值进行推定时，应考虑结构有效预应力值不确定性和不均匀性的影响。

4.7 构件性能检测

4.7.1 预应力构件的性能检验包括静力荷载试验及动力测试。结构构件性能检验时，应根据现场调查、检测和计算分析的结果，预测检验过程中结构的性能，并应考虑相邻的结构构件、组件或整个结构之间的影响。

【条文说明】荷载作用下结构的实际工作状况(挠度、应变)和结构自身的模态特征(自振频率、振型等)可根据结构参数通过计算确定。由于计算都是在一定的计算模型和本构关系基础上进行的，实际结构往往与计算模型不完全相符，损伤等对结构计算参数的影响也难以定量表述，当对计算确定的结构性能有异议或难以通过计算确定结构性能时，可通过荷载试验进行检验。

4.7.2 荷载作用下预应力结构的挠度、应变等实际工作状况和结构的自振频率、振型等模态特征可根据实测结果进行计算推定。当对计算结果存在异议时，可通过静力荷载试验及动力测试进行检验。

【条文说明】由于计算都是在一定的计算模型和本构关系基础上进行的，实际结构往往与计算模型不完全相符，损伤等对结构计算参数的影响也难以定量表述，当对计算确定的结构性能有异议或难以通过计算确定结构性能时，可通过荷载试验进行检验。

4.7.3 结构性能检验前，应根据结构可能出现的变形、损伤及破坏情况，制定应急预案。

4.7.4 预应力结构静力荷载试验检验应符合下列规定：

- 1 静力荷载试验检验内容宜包括构件的最大挠度、支座处的位移、控制截面应变、裂缝的出现与扩展情况等；
- 2 在进行静力荷载试验时，应观察并记录结构整体变形、局部变形、混凝土裂缝出现与开展过程等内容；
- 3 应变测试位置应根据计算分析结果确定，可选择变形较大或受力最不利截面作为控制截面，对于受弯构件宜选择跨中截面；

4 静力荷载试验检验应符合现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 的规定。

【条文说明】在进行静载检验时，观测项目主要包括三个方面：整体变形观测(挠度、扭转、支座沉降、转动等)、局部变形观测(应变)和现象观测(裂缝出现及裂缝宽度变化情况、混凝土压溃等)。

4.7.5 当预应力混凝土结构符合下列情况之一时，宜进行结构动力测试：

- 1 需要进行地震、工作环境或其他激励下的动力响应计算的结构；
- 2 需要通过动力参数进行结构损伤识别和故障诊断的结构；
- 3 在某种动力作用下，局部动力响应过大的结构。

4.7.6 预应力混凝土结构动力测试应符合下列规定：

- 1 动力检测应包括动力特性测试和动力相应测试；
- 2 动力特性测试可包括结构自振频率、振型和阻尼比等内容；
- 3 动力响应测试可包括结构受振动源激励后的位移、速度、加速度以及动应变等内容；
- 4 动力测试应根据需要选择测量内容及参数，测试方法应复合现行国家标准《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784 相关规定。

【条文说明】结构动力特性测试包括自振频率、振型和阻尼系数，这些参数是结构自身的模态参数，结构损伤可以通过这些模态参数进行识别，构件加固前、后状况也可通过模态参数的变化进行评估。结构动力反应不仅与结构自身状况有关，也与外加动力荷载有关。

5 预应力钢结构检测

5.1 一般规定

5.1.1 预应力钢结构的检测内容可分为材料性能、构件几何参数与缺陷、预应力效应、耐久性等内容，必要时，可进行结构性能的静载试验或结构的动力测试。

【条文说明】 预应力钢结构包括预应力张弦结构、悬索结构、斜拉结构、索膜结构等的建筑结构和斜拉桥、悬索桥等的公铁桥梁结构等。本条提出了预应力结构的检测工作。具体实施的检测工作和检测项目应根据委托方的要求、预应力钢结构的实际情况等确定。

5.1.2 材料性能、节点连接等钢结构共性内容应按现行国家标准《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 等有关规定进行检测和评定。

5.2 材料检测

5.2.1 预应力钢结构中的材料可分为钢结构钢材、预应力材料和锚具材料等。

5.2.2 预应力钢结构材料检测主要包括化学成分检测和力学性能检测等内容。

【条文说明】 当工程尚有与结构同批预应力材料时，可以将其加工成试件，进行钢材力学性能检测；当工程没有与结构同批的钢材时，可在构件上截取试样，但应确保结构的安全。当需要采用取样法检测预应力钢材的力学性能与化学成分时，应根据检测内容和目的确定取样部位、取样数量和样品尺寸，并应保证样品具有代表性。

5.2.3 钢构件的钢材性能应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的相关规定。

5.2.4 预应力材料性能应符合现行标准《预应力钢结构技术规程》CECS 212 的相关规定。

【条文说明】 预应力材料包括索体材料及拉杆材料：索体材料分为钢丝绳索体、钢绞线索体、钢丝束体和钢拉杆索体钢材等、拉杆包括钢拉杆和不锈钢拉杆等。拉索和拉杆的力学性能主要包括抗拉强度、伸长率、屈服强度等指标，现行《预应力钢结构技术规程》CECS 212 对索体材料质量、性能等进行了相关规定。

5.2.5 锚具材料应符合国家现行标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 和《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的规定。

5.2.6 当钢结构材料发生烧损、变形、断裂、腐蚀或其他形式的损伤，需要确定微观组织是否发生变化时，应进行金相检测。

【条文说明】 本条规定了钢结构需要进行金相检测的条件。

5.3 尺寸偏差与变形检测

5.3.1 预应力钢结构构件的尺寸偏差检测应包括：

- 1 构件截面尺寸；
- 2 标高；
- 3 轴线尺寸；
- 4 构件垂直度和平整度；
- 5 空间结构和拉索布置线形；
- 6 构件变形。

【条文说明】 构件的轴线（或中心线）尺寸可采用构件轮廓尺寸和零部件规格尺寸推定。钢结构零部件规格尺寸测量的方法，可按相关产品标准的规定量测。

5.3.2 预应力钢构件的尺寸应以照设计图纸的尺寸为基准确定尺寸偏差，尺寸的检测方法和尺寸偏差的允许值应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的相关规定。

【条文说明】 尺寸检测的范围应包括所抽样构件的全部几何尺寸，每个尺寸在构件的 3 个部位测量，取 3 处实测值的平均值作为该尺寸的代表值。钢构件的尺寸偏差应以最终设计文件规定的尺寸为基准进行计算。检测构件几何尺寸时，应采取措施消除构件表面抹灰层、装修层等造成的影响。

5.3.3 预应力材料、锚具及其连接件几何尺寸应满足其产品标准和设计的要求。

【条文说明】 索杆是预应力钢结构的基本结构单元，索杆材料直接关系到预应力结构的安全，因此，《钢结构预应力技术规程》CECS 212 中明确规定在预应力结构设计文件中应注明结构的使用年限，钢材、索杆和锚具材料的牌号和强度等级连接材料的型号和材料的性能，化学成分附加保证项目等。

5.3.4 预应力钢构件变形检测应符合下列规定：

- 1 测量可采用经纬仪、激光定位仪、三轴定位仪、全站仪、激光扫描仪等设备进行检测；
- 2 钢构件的垂直度、侧向弯曲矢高、扭曲变形，可根据测点间相对位置差计算；
- 3 竖向构件的弯曲度、垂直度、倾斜度，可根据测定的构件顶部相对于底部的水平位移计算；
- 4 预应力空间结构的变形，可根据结构控制点几何位置进行计算。

【条文说明】本条提出了预应力钢结构构件尺寸偏差与变形的的主要检测项目。

1 造成预应力钢结构变形的原因有重力荷载、地基沉降、火灾、地震影响、外因损伤、构件加工和安装偏差等。在实际工程中，需根据变形的原因和检测目的，确定变形检测项目。

2 对既有预应力钢结构钢构件的变形进行检测时，应消除外饰面或装修涂层的影响。

3 预应力受弯构件在活荷载作用下的垂直变形(挠度)值应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017的规定。预应力作用下构件的反向变形值应以两支座间连线为基线，取构件弯曲轴线对基线的最大垂直偏离值。此值不得超过对该结构规定的容许值。

5.3.5 水平构件的挠度宜采用水准仪或激光测距仪等方法进行检测，选取构件支座及跨中截面的若干点作为测点，可将构件跨中截面与支座的相对高差作为构件挠度。

5.4 构件缺陷检测

5.4.1 钢结构构件外观质量与内部缺陷检测应符合下列规定：

1 对于预应力钢结构的钢构件外观质量缺陷检测应按照现行国家标准《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 的相关规定进行；

2 预应力索体外观质量检测应采用目视的检测方法，护套表面应无破损、无难于清除的污垢，表面应圆整、光洁、无损伤和脱落；

3 索节点锚具内部缺陷可采用超声方法检测，对既有钢结构的索节点，当发现有影响结构承载能力的严重缺陷时，应全数检测。

【条文说明】本条提出了预应力钢结构构件尺寸偏差与变形的的主要检测项目。

1 对预应力钢结构构件，应对缺陷和损伤部位进行 100%的检测，其余部位应进行不小于 20%的检测。

2 对于钢板缺陷检测，厚度小于 6mm 的钢板可采用表面检测方法检测；厚度大于等于 6mm 的钢板可采用《厚钢板超声检测方法》GB/T 2970 进行检测。

5.4.2 预应力钢结构腐蚀与涂装保护检测应包括预应力拉索/拉杆、索头与锚固体系、拉索/拉杆与钢结构连接节点的镀层/涂层，拉索的外包 PE 护套检测，检测内容包括腐蚀损伤面积、腐蚀损伤程度、腐蚀速度的检测、护套破坏大小和深度等。

5.4.3 预应力钢结构涂装检测应以整个结构为对象，划分为若干个结构单元，对每个结构单元应采用全数普查、重点抽查的原则，取样应选择具有代表性的部位，检测方法应符合下

列规定：

- 1 钢构件涂层外观质量可采用观察检查，宜全数普查；
- 2 涂层裂纹可采用观察检查和尺量检查；
- 3 涂层完整性可采用观察检查，宜全数普查；
- 4 涂层厚度可采用膜测厚仪检测。

5.4.4 预应力拉索索头、锚固系统、连接节点应根据防腐涂层类别按下列规定进行检测：

- 1 应根据防腐涂层类检测涂层厚度、涂层损伤等；
- 2 当涂层破坏时，应检测锚具钢材的锈蚀程度。

5.4.5 预应力拉索的涂层及护套检测应按下列规定进行：

1 预应力钢结构拉索应重点检查拉索涂层损伤位置、外包护套破损位置的拉索应力腐蚀情况，特别是荷载变化频率较大部位的应力腐蚀情况，避免应力腐蚀造成的钢索耐久性损伤；

2 高钒索、镀锌索、环氧涂层索等涂层索应检测涂层厚度、涂层损伤程度，拉索自身腐蚀程度等，是否有锈蚀引起的散丝、变形；

3 预应力拉索的外包 PE 护套索应检测护套的老化、裂缝、破损情况，并检测破损位置处拉索基体的腐蚀程度，应重点检测 PE 护套的拉索上端管顶及索锚连接处等部位，检测方法可参照涂膜检测方法进行；

【条文说明】预应力钢结构中非预应力钢构件及其连接的耐久性检测和评定按照本章普通钢结构的调查与检测内容进行。预应力拉索处于高应力状态，应根据应力大小确定应力腐蚀敏感性和应力腐蚀速度。

其他类拉索，检测相应的防腐涂层厚度、涂层损伤程度，拉索自身腐蚀程度等。

预应力拉索、拉杆主体的外包 PE 护套索可采用目测方法进行检测，观测护套表面老化、裂缝、破损情况，根据目测结果判定是否需要开凿护套，使钢丝外露以了解索体锈蚀、断丝情况。

5.5 连接检测

5.5.1 预应力钢结构焊接节点检测应包括焊缝外观质量检测、内部缺陷检测、焊接构造、焊缝锈蚀等。进行检测前，应清除检测部位表面的油污、浮锈和其他杂物。必要时，可截取试样进行力学性能检验。

【条文说明】安装连接形式焊缝可分为角焊缝和对接焊缝。角焊缝的外观质量包括裂纹、

咬边、根部收缩、弧坑、电弧擦伤、表面夹渣、焊缝饱满程度、表面气孔和腐蚀程度等。

对接焊缝的外观质量包括裂纹、咬边、根部收缩、弧坑、电弧擦伤、接头不良、表面夹渣、焊缝饱满程度、表面气孔和腐蚀程度等。

5.5.2 进行焊接节点检测前，应收集与焊接节点有关的原始资料，当资料不全时，可通过现场测绘和取样试验确定相关内容。原始资料主要包括以下内容：

- 1 设计文件对钢材、焊接材料的规格、型号、材质的要求；
- 2 设计文件对焊接节点和焊缝质量等级的要求；
- 3 焊接工艺技术文件及操作规程；
- 4 焊接工程检测和验收资料。

5.5.3 焊缝检测的抽样应符合下列规定：

- 1 检测抽样比例应不少于 10%，且不少于 3 处；
- 2 焊缝处数的计数方法：工厂制作焊缝长度不大于 1000mm 时，每条焊缝应为 1 处；长度大于 1000mm 时，以 1000mm 为基准，每增加 300mm 焊缝数量应增加 1 处；现场安装焊缝每条焊缝应为 1 处。

3 宜采用随机取样方式取样，抽样位置应覆盖结构的关键部位、代表性区域以及不同焊缝形式的区域。

5.5.4 焊缝检测包括外观质量检测 and 内部缺陷检测，检测方法应符合现行国家标准《钢结构焊接标准》GB 50661 的规定。测量焊缝余高和焊脚尺寸时，应沿每处焊缝长度方向均匀量测 3 点，取其算术平均值作为实际尺寸。

【条文说明】焊缝尺寸包括焊缝长度、焊缝余高。焊缝外观质量检查宜用目测，并辅以低倍放大镜，必要时可采用磁粉探伤或渗透探伤；焊缝内部质量探伤检查一般采用超声波无损检测方法；当超声波探伤不能对缺陷性质做出判断或有专门要求，可采用射线探伤进行检测、验证；焊缝尺寸检查可采用量具卡规进行量测；焊缝熔敷金属的力学性能应截取试样进行检验。

5.5.5 对于严重锈蚀和损伤的焊缝，应测量其剩余长度和有效厚度。计算焊缝承载能力时，应考虑焊缝受力条件改变以及腐蚀损失的不利影响。

5.5.6 螺栓连接检测的内容应包括螺栓等级、连接构造及尺寸、变形、锈蚀及损伤等。当不能确定等级时，可取样进行力学性能检验

【条文说明】本条及本节以下条文中提到的螺栓，除特别说明外均包含普通螺栓和高强度螺栓(摩擦型连接和承压型连接)。鉴于铆钉已很少采用，本节主要用于螺栓连接的检测与

鉴定。当对既有结构中的螺栓或铆钉的力学性能有疑义时，则需要取样进行力学性能检验。

5.5.7 螺栓连接检测的抽样应符合下列规定：

1 检测的抽检比例不应少于同类节点数的 10%，且不应少于 3 个节点，抽查位置应覆盖结构的大部分区域以及不同连接形式的区域；同类节点总数不足 10 个时，应全数检查；每个抽查节点检测的螺栓和铆钉数，不应少于 10%，且不应少于 3 个。

2 有损伤的节点和指定检测的节点，应全数检查。

5.5.8 螺栓连接的构造与尺寸检测应包括下列内容：

1 螺栓的规格、孔径、间距、边距，螺栓和铆钉的质量等级、数量、排列方式，节点板尺寸和构造；

2 高强度螺栓连接尚应包括螺母数量、螺栓头露出螺母的长度、节点板及母材的厚度。

【条文说明】 紧固件检测的数量和部位应具有代表性，同时要考虑实际操作的工作量，常规检测可采用抽样检测的方法，需要先对节点进行分类，每类节点的抽检数量不应少于 10% 和 3 个，每个检测节点上抽取一定数量的螺栓和铆钉进行详细检测。

5.5.9 螺栓连接的变形、锈蚀及损伤的检测应包括：螺杆断裂、弯曲，螺栓和铆钉脱落、松动、滑移，连接板栓孔挤压破坏，腐蚀程度。

5.5.10 在下列情况下，预应力钢结构连接节点宜通过试验进行可靠性鉴定：

1 按现有计算手段尚不能准确评定连接节点的可靠性；

2 连接节点验算缺少应有的参数；

3 需要确定连接节点的实际承载能力。

5.6 索力检测

5.6.1 在役预应力拉索宜根据使用年限、服役状态，安排定期的索力检测与评定，设有预埋传感器的预应力拉索，可直接读取预埋传感器的索力数据。

【条文说明】 条文说明：预埋传感器包括但不限于智能光纤钢绞线、磁通量传感器、力传感器等。采用磁通量法测量索力时应按照《磁通量索力检测仪》JJG 142 相关要求执行。拉索的定期检测间隔不宜长于 10 年。

5.6.2 当拉索数量较少时，宜全数检测；对于复杂预应力钢结构，预应力拉索检测应分批次抽检，每批次抽检率不应少于 15%。

【条文说明】 拉索的批次根据预应力钢结构的安全等级、拉索的尺寸、布设类项等分类确定。

5.6.3 检测过程不应破坏索体及结构，单根拉索检测次数不宜少于 3 次，以多次测试的平均值作为最终检测值。

【条文说明】预应力钢结构中的拉索，除应保证索材在弹性状态下工作外，在各种工况下均应保证索力大于零。

5.6.4 无预埋传感器的预应力拉索，可采用频率法、千斤顶张拉测试法等测试索力。

5.6.5 直径不大于 36mm 索体索力可采用弓式测力仪测量。

5.6.6 采用频率法测试索力时应符合以下规定：

- 1 动力时程数据测试可采用加速度、速度或位移传感器；
- 2 采样频率不宜小于 50Hz；
- 3 采集环境白噪声激励的动力时程时，测试时间不宜小于 30s；
- 4 拉索分析时应考虑拉索的抗弯刚度、边界约束条件和垂度效应的影响。

【条文说明】基于频率法推定拉索索力计算公式如下式所示：

$$T_m = \lambda \cdot 4\rho l^2 f^2$$

式中： T_m —实测索力值 (N)；

ρ —拉索单位长度密度 (kg/m)；

l —拉索两端固结长度 (m)；

f —拉索基频 (Hz)；

λ —影响因素函数；

拉索分析时应考虑拉索的抗弯刚度、边界约束条件和垂度效应的影响；当考虑抗弯刚度时， λ 可取为 $1 + \frac{C_y^2}{4\rho^2 f^2 \pi^2} - \frac{EI\pi^2}{4\rho f^2 l^2}$ ， C_y 表示阻尼系数，不考虑阻尼影响时，可取为 0。

5.6.7 采用千斤顶张拉测量索力时，需在张拉作业后方做好防护和警示，避免人员在拉索后方停留或穿行，检测过程应保证拉索的索力无损失。

5.6.8 预应力拉索实测索力与设计索力的偏差率可按下列规定计算：

$$K_s = \frac{T_m - T_d}{T_d} \times 100\% \quad (5.6.7)$$

式中： K_s —索力偏差率 (%)；

T_m —实测索力值 (kN)；

T_d —设计索力值 (kN)。

5.6.9 当索力的偏差率超过 10% 时，应分析原因并及时对拉索索力值进行调整。

5.7 构件性能检测

5.7.1 对于大型、复杂和新型预应力钢结构，宜进行结构性能的静力荷载试验和动力测试。

5.7.2 预应力钢结构的静力荷载试验应符合现行国家标准《高耸与复杂钢结构检测与鉴定标准》GB 51008 的规定。

5.7.3 预应力钢结构的静力荷载试验检验应符合下列要求：

1 检验荷载不应超过结构承受的可变荷载标准值；

2 检验荷载应分级施加，每级荷载不应大于最大试验荷载的 20%；

3 每级检验荷载施加后应对检测数据进行分析；

4 当结构构件出现应变达到或接近屈服应变、位移或变形超出预期、发生平面外变形以及局部失稳迹象中的任一情况时，应采取卸除检验荷载的措施。

5.7.4 静力荷载试验检验时，应选用适用的方法实时监测预应力钢结构构件的应力、位移或变形。

5.7.5 预应力钢结构的动力检测，应符合下列规定：

1 动力检测应包括动力特性检测和动力响应检测；

2 动力特性检测可获取结构自振频率、振型、模态阻尼比，若有特殊要求，可获取模态刚度、模态质量等结构动力性能参数；

3 动力响应检测可获取结构动力输入处和响应最大处的位移、速度、加速度。

5.7.6 对于下列预应力钢结构，宜进行动力检测：

1 需要获取结构动力参数的重要、大型、复杂和新型预应力钢结构；

2 需要进行抗震、抗风、工作环境或其他激励下动力响应计算的结构；

3 振动可对使用功能产生影响的结构；

4 需要通过动力参数进行损伤识别的结构；

5 需要获取灾后受损或老化受损钢结构的动力参数，以便对钢结构能否继续使用和是否需要加固进行正确决策的结构。

5.7.7 预应力钢结构的动力检测，可选择下列方法：

1 检测结构的基本模态时，宜选用环境激励法、初始位移法或重物撞击法；

2 检测结构平面内有多个模态时，宜选用稳态正弦波激振法；

3 检测结构空间模态或扭转模态时，宜选用多振源相位控制同步的稳态正弦波激振法或初速度法；

4 评估结构的抗震性能时，可选用随机激振法或人工爆破模拟地震法；

5 对于单点激励法测试结果，必要时，可采用多点激励法进行校核。

【条文说明】对于大型复杂结构，单点激励显得能量不够，且在传递过程中损失较大，因此，距激励较远的地方，响应信号较弱，信噪比较小。若增大激励力，则容易产生局部效应过大，造成非线性现象。另外，单点激励时，若激励点正好处于某阶模态的节点位置，对该阶模态来说，系统将成为不可控和不可观的，因此，将无法辨识该阶模态，就会发生漏失模态的现象。对于单输入多输出系统，模态参数辨识一般只利用频响函数矩阵中的一列数据，因此，能提供的信息量有限，影响辨识精度，对模态密集的情况，辨识能力较弱。在下列情况下必须进行多点激励：

1 重频、密频；

2 结构巨大，需要大的能量激励；

3 激励点为某阶模态的节点。

5.7.8 预应力钢结构的动力检测宜按本规程附录 C 进行。

5.7.9 当预应力钢结构需进行动力检测时，自振频率检测评定宜按本规程附录 D 进行。

6 预应力结构鉴定

6.1 一般规定

6.1.1 预应力结构鉴定包括构件鉴定和子单元及单元的鉴定，预应力构件的可靠性鉴定除应符合本节相关规定外，尚应符合下列规范的规定：

1 民用建筑应符合现行国家标准《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 的有关规定。

2 工业建筑应符合现行国家标准《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144 的有关规定。

3 预应力公路、铁路桥梁应符合现行标准《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99 或《城市桥梁检测与技术评定技术规范》CJJ/T 233 等的有关规定。

4 核电安全壳结构应符合现行国家标准《核电厂建构筑物维护及可靠性鉴定标准》GB 51323 的有关规定。

【条文说明】本规程规定的预应力结构检测鉴定范围包括预应力的构件、子结构或者结构及其连接。对于结构和结构，不同体系的标准都有体系性和详尽的规定，本规程中对于预应力结构的安全性和使用性鉴定重点为预应力构件的鉴定。

6.1.2 预应力结构或构件应按承载力极限状态和正常使用极限状态进行验算，计算应参考以概率理论为基础的极限状态设计方法，并按分项系数设计表达式进行计算。

【条文说明】当按承载力极限状态进行预应力结构计算时，应考虑荷载效应的基本组合或荷载效应的偶然组合，并应采用荷载设计值和强度设计值进行计算。当按正常使用极限状态设计预应力结构时，应考虑荷载效应的标准组合，并应采用荷载标准值和变形限值进行计算，预应力混凝土结构的变形限值按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定取值；预应力钢结构的变形限值：当为预应力基本构件或预应力平面构件时，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定取值，当为预应力空间结构时按现行国家标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7 的规定取值。

本条还涉及预应力混凝土结构及预应力钢结构的结构分析计算规定，现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 规定了结构采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，本规范规定了预应力结构构件设计基本原则。

6.1.3 预应力结构可靠性鉴定可采用理论验算、数值模拟等方法，计算分析所采用的简化方法和近似假定，应有理论或试验依据或经工程实践验证；所采用的计算模型，应符合结构的实际受力、构造状况和边界条件。

【条文说明】预应力结构可靠性的鉴定应根据实际检测对结构进行分析，分析时应考虑环

境、结构累计损伤对材料、构件、节点以及结构性能的影响。理论分析所需的各种几何尺寸、材料特性参数、连接特征参数应根据检测结构取值。分析所采用的简化方法和近似假定，应有理论或试验依据或经工程实践验证。分析采用的计算模型应是根据结构实际状况建立的二维或三维模型，并应符合钢结构的实际构造和实际工作状态。

当结构按承载能力极限状态验算时，根据结构对荷载的反应，可采用线形、非线性或弹塑性理论，当结构按正常使用极限状态验算时，可采用线形理论，必要时可采用非线性理论。

预应力钢结构可分为预应力基本构件、预应力平面结构和预应力空间结构。预应力基本构件包括预应力拉杆、预应力压杆和预应力实腹梁。预应力平面结构包括预应力桁架、预应力拱架、预应力框架和预应力吊挂结构。预应力空间结构包括预应力立体桁架、预应力网架、预应力网壳、预应力玻璃幕墙钢结构和预应力索膜结构。

6.1.4 结构按承载能力极限状态验算和按正常使用极限状态验算时，应对结构上的荷载（作用）进行核定，包括荷载（作用）形式、数值、作用位置、荷载组合种类等，荷载确定及荷载效应计算应符合下列规定：

- 1 当预应力结构的荷载符合现行国家现行标准规定时，应按规范规定的取值核定；
- 2 有特殊情况时，应按实际情况参照现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 的规定核定。
- 3 当结构受到温度、变形等作用，且对其承载有显著影响时，应计入由之产生的附加内力。
- 4 预应力效应应按永久荷载效应考虑。
- 5 结构计算中的重要性系数、分项系数、组合系数、动力系数等系数，应按国家现行相关标准的规定采用。

【条文说明】 1 当预应力建筑结构的荷载取值参考现行国家现行标准《建筑结构荷载规范》GB50068；预应力桥梁结构的荷载取值参考现行国家现行标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 或《铁路桥涵设计规范》TB10002；预应力安全壳结构的荷载参考现行国家现行标准《核电厂厂房设计荷载规范》NB/T 20105。

6.1.5 既有预应力结构材料的强度设计值，应根据构件的实际状况和已获得的检测数据，按下列原则取值：

- 1 当材料的种类和性能符合原设计要求时，且不怀疑结构有严重的性能退化时，可按原设计标准取值；
- 2 当材料的种类和性能不详、或与原设计不符、或材料性能已显著退化时，应采用根

据检测结果按国家现行检测技术标准推定取值。

【条文说明】准确确定结构材料强度设计值是得出合理的构件承载力的前提条件。参照国际标准《结构可靠性总原则》ISO 2394 的规定，当材料的种类和性能符合原设计要求时，可按原设计标准取值；当材料的种类和性能不详或与原设计不符或材料性能已显著退化时，应根据实测数据按现行国家有关检测标准，如现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的规定确定材料的强度设计值。

6.1.6 结构或构件的几何参数应采用实测值，并应计入锈蚀、腐蚀、腐朽、虫蛀、风化、裂缝、缺陷、损伤以及施工偏差等的影响。

6.1.7 抗震设计的预应力构件，除应进行承载力和使用性鉴定外，还应按抗震设防要求进行抗震性能评估。

6.1.8 当设计资料与现场实际情况不符时，应以结构实际测数据为准进行鉴定。

【条文说明】当设计资料与现场实际情况不符时结合原设计计算书、施工图或竣工图，重新进行一次复核，推测实际变更原因，找出系统性问题，并以结构实际服役特征为基准进行检测鉴定。

6.2 预应力混凝土结构构件验算

6.2.1 预应力混凝土结构的承载能力极限状态验算和正常使用极限状态及施工阶段验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

6.2.2 有粘结预应力、缓粘结预应力混凝土结构正截面承载能力极限状态验算时，预应力筋应力设计值应取所用预应力筋的抗拉强度设计值。

6.2.3 无粘结预应力混凝土结构正截面承载能力极限状态验算时，应考虑预应力筋内应力增量的影响，无粘结预应力筋的应力设计值应取有效预应力及应力增量之和，其中应力增量的计算应符合现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 相关规定。

6.2.4 当不具备预应力筋有效预应力检测条件时，预应力筋有效预应力值可取扣除所有阶段预应力损失后的预应力值。

6.2.5 当具备预应力筋有效预应力检测条件时，同一批次预应力筋有效预应力值应根据检测样本，按下列规定进行推定：

1 在预应力筋结构使用性鉴定时，既有预应力混凝土结构有效预应力值可根据检测样本均值进行推定；

2 在预应力筋结构安全性鉴定时，既有预应力混凝土结构有效预应力值可根据检测样本具有 95% 保证率的特征值和平均值进行推定。为保证结构的安全，宜选取 95% 保证率的特征值的下限值为有效预应力推定值；

3 当测点数量 ≥ 10 个时，宜采用数理统计建立检测数据与实际有效应力分布的联系，进

而计算有效应力推定值；

4 当测点数量较少时，且抽样检测结果推定区间下限值小于样本中最小值时，应取最小值作为推定值；

5 当检测批的变异性大于结构设计依据的有关标准的变异系数时，应取检测结构的最小值作为检测值的代表值；

6 若检测样本具有 95% 保证率的特征值下限值小于设计值，结构有效应力应按设计值进行计算。

6.2.6 预应力混凝土结构验算应计入预应力作用效应；对超静定结构，相应的次弯矩、次剪力及次轴力等应参与组合计算。并应符合下列规定：

1 对承载能力极限状态，当预应力作用效应对结构有利时，预应力作用分项系数 γ_p 应取 1.0，不利时 γ_p 应取 1.3；对正常使用极限状态，预应力作用分项系数 γ_p 应取 1.0。

2 对参与组合的预应力作用效应项，当预应力作用效应对承载力有利时，结构重要性系数 γ_0 应取 1.0。当预应力作用效应对承载力不利时，结构重要性系数 γ_0 在持久设计状况和短暂设计状况下，对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1；对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0；对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9。对地震设计状况下应取 1.0。

【条文说明】 根据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的有关规定，当进行预应力混凝土构件承载能力极限状态及正常使用极限状态的荷载组合时，应计算预应力作用效应并参与组合，对后张法预应力混凝土超静定结构，预应力效应包括预应力产生的次弯矩、次剪力和次轴力。在承载能力极限状态下，预应力作用分项系数 γ_p 应按预应力作用的有利或不利分别取 1.0 或 1.2。当不利时，如后张法预应力混凝土构件锚头局压区的张拉控制力，预应力作用分项系数 γ_p 应取 1.3。在正常使用极限状态下，预应力作用分项系数 γ_p 通常取 1.0。当按承载能力极限状态计算时，预应力筋超出有效预应力值达到强度设计值之间的应力增量仍为结构抗力部分。

6.2.7 预应力混凝土结构构件正常使用极限状态内力分析应符合下列规定：

1 在确定内力与变形时应按弹性理论值分析。由预加力引起的内力和变形可采用约束次内力法计算。当采用等效荷载法计算时，次剪力宜根据结构构件各截面次弯矩分布按结构力学方法计算。

2 构件截面的几何特征可按毛截面计算。

【条文说明】 预应力筋由于布置上的几何偏心引起的主弯矩 N_{pepm} 以 M_1 表示。由该弯矩对构件赘余支座引起的支座反力称为次反力，由次反力对构件引起的弯矩称为次弯矩 M_2 。在预应力混凝土超静定构件中，由预加力对任一截面引起的综合弯矩 M_r 为主弯矩 M_1 与次弯矩 M_2 之和，即 $M_r = M_1 + M_2$ 。次剪力可根据结构构件各截面次弯矩分布按力学分析方法计

算。

约束次内力是只先将超静定结构多余约束完全固定，计算出预应力作用下的约束内力；再将多余约束放松并施加约束内力，计算约束内力在多余约束上的分配，进而计算次内力的方法。

6.3 预应力钢结构构件验算

6.3.1 预应力钢结构的验算应模拟预应力张拉阶段和加载阶段的工况。应进行结构和构件的强度、刚度和稳定性计算，必要时应考虑结构非线性影响。

【条文说明】 预应力是施加的外加荷载。它可以改善结构特性并与结构共生共存，属于永久荷载。但是，因其产生的方法不同，量测各异，所以其施加力度又与可变荷载相近。

6.3.2 预应力钢结构中的拉索，除应保证索材在弹性状态下工作外，在各种工况下均应保证索力大于零。钢索拉力设计值不应大于钢索破断力的 40%~55%，重要索取低值，次要索取高值。

【条文说明】 钢索强度设计值的确定，关系到结构的安全可靠，材料有效利用，成本经济合理。对各种不同的使用条件，取值不尽相同，而且各国规范、手册中的规定大相径庭。考虑到张拉荷载的特性，建议综合荷载系数采用 1.3，参照混凝土结构设计规范对钢绞线的规定，钢索的材料分项系数可采用 1.5，并结合预应力钢结构在我国的实践情况，增设超张拉系数 1.1，因此钢索的总安全度 K 在 2.15 左右， $K = \text{综合荷载系数} \times \text{材料分项系数} \times \text{超张拉系数} = 1.3 \times 1.5 \times 1.1 = 2.15$ 。

对重要的动力荷载作用下的钢索，其设计强度有的只取极限抗拉强度的 20% 或更少，有些工业发达国家取用 33%，但国内外已建工程也有采用 55%~60% 的。考虑到国内工程经验不多，目前尚无大量统计数据的情况，本规程规定我国建筑工程暂时采用 40%~55% 的比值。结构中的重要索是指影响结构整体安危的索系，次要索是指只影响结构局部的索系。

6.3.3 加固后预应力钢结构的设计验算，可按组合构件验算，亦可将组合构件拆分成单一构件分别验算其承载力和刚度，并应验算组合构件的整体变形。

【条文说明】 采用传统的简化近似公式难以获得准确计算结果，为了保证安全，应采用较为精确的数值计算方法进行验算。

6.4 预应力结构构件鉴定

6.4.1 预应力结构构件的安全性等级应按预应力构件及其连接分别进行评定，并取其中较低

的评定等级作为预应力构件的安全性等级。

【条文说明】 单个构件安全性等级的确定，取决于其检查项目所评的等级，最简单的情况是：被鉴定构件的每一检查项目的等级均相同。此时，项目的等级便是构件的安全性等级。但在不少情况下，构件各检查项目所评定的等级并不相同，此时，便需制定一个统一的定级原则，才能唯一地确定被鉴定构件的安全性等级。在结构中，考虑到其可靠性鉴定被划分为安全性鉴定和使用性鉴定后，在安全性检查项目之间已无主次之分，且每一安全性检查项目所对应的均是承载能力极限状态的具体标志之一。在这种情况下，不论被鉴定构件拥有多少个安全性检查项目，但只要其中有一等级最低的项目低于 b_u 级(例如 c_u 级或 d_u 级)，便表明该构件的承载功能，至少在所检查的标志上已处于失效状态。由之可见，该项目的评定结果所反映的是鉴定构件承载的安全性或不安全性，因此，本标准采用了按最低等级项目确定单个构件安全性等级的定级原则。这也就是所谓的“最小值原则”。尽管有个别意见认为，采用这一原则过于稳健，但就构件这一层次而言，显然是合理的。

6.4.2 预应力构件的安全性和使用性应基于构件实际材料特性及损伤情况，根据结构类型的不同，依据相应的国家现行规范进行鉴定评级。

1 预应力混凝土构件安全性应按承载能力、构造、不适用于承载的位移或变形、裂缝或其他损伤等四个检查项目评定。

2 预应力混凝土构件的使用性评定应按裂缝、变形、缺陷和损伤、腐蚀等检查项目评定。

3 预应力钢结构构件的安全性鉴定，应按承载能力、构造以及不适于承载的位移或变形等检查项目评定。

4 预应力钢结构构件的使用性鉴定，应按位移或变形、缺陷和锈蚀或腐蚀等检查项目评定。

【条文说明】 混凝土结构构件、钢结构构件的安全性和使用性鉴定应检查的项目，是在《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 定义的承载能力极限状态基础上，参照国内外有关标准和工程鉴定经验确定的。

6.4.3 预应力构件的安全性和使用性鉴定评级，应基于有效预应力检测结果，并考虑结构实时有效预应力作用的影响。

【条文说明】 6.4.3~6.4.6 混凝土结构构件、钢结构构件的安全性和使用性鉴定应检查的项目，是在《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 定义的承载能力极限状态基础上，参照国内外有关标准和工程鉴定经验确定的。

6.4.4 预应力构件进行安全性和使用性鉴定评级时，应结合结构剩余使用年限，考虑有效预

应力时变作用的影响。

6.4.5 当预应力构件存在明显变形、裂缝、腐蚀、预应力损失过大等缺陷时，应综合分析缺陷对构件承载能力和安全性评级的影响。

6.4.6 出现腐蚀的预应力拉杆、拉索进行使用性评定时，应符合以下规定：

1 预应力钢结构拉杆基体腐蚀程度评定等级应符合表 6.4.6-1 的规定。

表 6.4.6-1 预应力钢结构拉杆基体腐蚀程度评定等级

等级	腐蚀状态
a	钢材表面无腐蚀。
b	钢材表面轻微腐蚀，深度未超过 0.05t。
c	钢材有腐蚀或严重腐蚀，发生层蚀、坑蚀现象，腐蚀深度超过 0.05t。

2 预应力钢结构拉索基体腐蚀程度评定等级应符合表 6.4.6-2 的规定。

表 6.4.6-2 预应力钢结构拉索基体腐蚀程度评定等级

等级	腐蚀状态
a	拉索表面无腐蚀或轻微腐蚀，无断丝断裂
b	拉索部分钢丝锈蚀，钢丝锈蚀造成单索钢丝总面积损失小于或等于 10%；或个别钢丝断裂，但断裂面积小于或等于该索钢丝总面积的 2%，
c	拉索钢丝锈蚀严重，钢丝锈蚀造成单索钢丝总面积损失大于 10%，或钢丝断裂面积大于该索钢丝总面积的 2%

【条文说明】 6.4.6 预应力拉索（杆）长期处于高拉应力与腐蚀环境共同作用下，易发生应力腐蚀现象。应力腐蚀的破坏过程与普通的电化学锈蚀存在明显区别，往往导致预应力拉索（杆）基材的承载能力在远远未达到其极限抗拉强度时发生无征兆的脆性断裂。此外，相比于普通钢结构构件，预应力拉索（杆）作为预应力钢结构的关键受力构件，一旦发生腐蚀破坏后果将更加严重。因此，综合考虑预应力钢结构拉索（杆）应力腐蚀机理和破坏后果，并参考普通钢构件基材耐久性评定，本标准对预应力拉索（杆）制定了更加严格的耐久性评定标准，以保证预应力结构的服役安全。

7 预应力混凝土结构改造和加固

7.1 一般规定

7.1.1 预应力混凝土构件及其影响范围内的混凝土构件加固应按照规范本节进行，其他构件的加固应符合国家现行有关标准的相关规定。

7.1.2 预应力混凝土结构的改造可包括预应力混凝土板开洞、预应力混凝土梁截断及托梁换柱等。

7.2 预应力混凝土结构改造

7.2.1 既有预应力混凝土结构的改造，应综合考虑结构现状、改造后适用功能、后续使用年限和改造施工条件等因素，既有预应力混凝土结构的改造设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的相关规定。

【条文说明】既有预应力混凝土结构改造前的结构现状和施工条件不同，改造后的使用功能和后续使用年限等因素发生了改变，这些因素会影响改造后结构的荷载与地震作用，结构的内力和承载力，本条做出相应的规定以应对这些变化。

7.2.2 既有预应力混凝土结构改造，应根据结构现状和改造施工工艺，采取安全防护措施防止改造过程中发生结构性破坏或倒塌。

7.2.3 预应力混凝土结构改造，应进行施工阶段验算，当改造涉及到多次体系变换时应根据体系变换分段计算，计算时材料强度应取标准值。

【条文说明】对于改造过程中需要拆除的重要承重构件、显著增大既有结构内力或结构存在失稳可能性等危及施工期间结构安全的情形，与正常使用阶段的结构受力条件相比，改造施工阶段的结构受力条件有所不同，很可能更为不利，需要对改造施工阶段的不同受力状态分别进行结构分析，确定其最不利组合，保证改造施工阶段结构安全。

7.2.4 预应力混凝土结构改造，应对改造后的预应力新构件进行结构承载力计算和正常使用阶段验算。

7.2.5 预应力混凝土结构改造应尽可能避免截断预应力混凝土梁，当需要截断预应力混凝土梁时，应考虑截断后对相关构件的不利影响，并做好相应的临时支撑和结构加固。

7.2.6 当楼板开洞时，应对洞口周边进行加固；当洞口离预应力混凝土梁较近且减小了梁翼缘宽度时，应对被洞口影响的预应力混凝土梁进行验算，当不能满足设计要求时，应进行加固处理。

7.2.7 预应力混凝土结构改造，当需要进行预应力筋破断时，应按照下列规定进行：

- 1 预应力筋破断宜先采取措施释放预应力筋内应力，然后进行预应力筋的破断，断筋

应采取措施，保障结构和施工人员的安全。

2 预应力截断后，应对截断位置处预应力筋进行重新张拉锚固，且张拉的控制应力应不低于设计要求。

3 锚具及外露预应力筋应涂覆专用防腐润滑脂，并采用混凝土封堵。

【条文说明】截断预应力筋将影响构件受力体系，并释放较大的能量，导致相关构件内力发生较大变化，甚至失去支撑，对主体结构产生较大的不利影响。楼板开洞切断了预应力筋及部分楼板配筋，改变了原有传力路径，一方面导致洞口周边板的内力增大，造成应力集中；另一方面由于板筋减少，楼板承载力降低。因此，应对开洞后的楼板进行内力分析和承载力验算，根据计算结果，进行加固设计。

无黏结预应力楼板开洞切断预应力筋后，该预应力筋就完全丧失功能。对整体张拉的楼盖而言影响范围很大，故在进行洞口加固的同时，尚应对被切断的预应力筋进行预应力恢复处理。当洞口宽度 $b \leq 1\text{m}$ 或洞口直径 $D \leq 1\text{m}$ 时，可采用封闭型钢框方案，即在洞口四周增设组合型钢框，将切断的预应力钢筋重新张拉，并锚固于型钢框；当 $b > 1\text{m}$ 或 $D > 1\text{m}$ 或切断的预应力筋较多，或洞口周边存在较大的集中荷载，或切断梁肋时，应另设封闭支承梁。

7.2.8 既有混凝土结构的预应力托梁换柱改造，应符合下列规定：

1 预应力混凝土托换梁的设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定，并考虑预应力的施加对相关结构的影响。

2 验算托换梁在预应力张拉阶段的内力和变形时，应考虑既有结构对托换梁的约束作用；预应力张拉产生的反拱值不应大于 $l_0/2500$ ，其中 l_0 为托换梁的计算跨度，取托换柱之间的净间距。

3 既有结构及托换结构在改造过程中及改造完成后产生的变形应满足表 7.2.8 要求。

表 7.2.8 既有结构及托换结构变形限值

托梁结构变形	限值
短期荷载作用下托换梁的跨中挠度	$\leq l_0/800$
长期荷载作用下托换梁的跨中挠度	$\leq l_0/400$
在托换改造过程中产生的柱间沉降差不应大于	$\leq 0.0015l_0$
柱间最终沉降差不应大于	$\leq 0.0025l_0$

4 对于既有结构预应力托换改造，应按改造后的结构进行整体结构分析，充分考虑托换改造对相关构件的影响，并对相关构件进行必要的加固设计。

5 托梁换柱施工应进行全程监测，监测内容应包括顶升梁和落架过程中相应构件应变的变化、支顶位移、支顶反力等，必要时可监测加固梁与原柱是否协调工作。若托换梁挠度大于规范要求或托换梁裂缝超过规范要求，应及时停止施工，并通知设计单位，分析原因并采取措施。

【条文说明】1 预应力混凝土托换梁的设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定，并考虑预应力的施加对相关结构的影响，托换过程中，对影响整体程度的不同，可采取对竖向承载力进行验算、局部进行验算和整体进行验算等几种情况进行结构验算。

3 对既有结构及托换结构在改造过程中及改造完成后产生的变形限值中，考虑到结构改造是一个较短时间内完成的过程，上部结构耐受短时间变形的能力要低于耐受长时间变形的能力。有鉴于此，相邻托换柱之间沉降差限值的取值比现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定的普通基础沉降差限值更加严格，本条所指在托换改造过程中产生的柱间沉降差，既包括因地基扰动产生的附加沉降差，也包括托换过程中内力重分布引起的沉降差。同时，托换梁的挠度值实际上也是被托换柱和托换柱之间的一种沉降差，不能单单考虑梁自身的裂缝及变形，而应从逐渐沉降差对上部结构的影响来考虑托换梁的挠度限值。

4 须先对梁柱进行加固处理，待加固梁柱承载力满足设计及规范要求时方可进行柱拆除施工。框架柱的拆除应与预应力张拉同步进行，柱拆除应先将柱顶部位与原结构断开，再进行后续拆除施工。

5 施工监测包括柱拆除柱千斤顶监测、钢筋应变监测、张拉过程中以及张拉结束后主梁挠度监测、张拉过程中周构件的应变监测和裂缝的开展情况监测。通过监测提供的数据，为施工提供依据，以确保结构处于安全的状态。

7.3 预应力混凝土构件加固

7.3.1 预应力混凝土结构的加固设计，应与实际施工方法紧密结合，采取有效措施，保证新增构件和部件与原结构连接可靠，新增截面与原截面粘结牢固，形成整体共同工作；并应避免对未加固部分，以及相关结构、构件和地基基础造成不利的影

【条文说明】在当前的结构加固设计领域中，经验不足的设计人员占较大比重，致使加固工程出现“顾此失彼”的失误案例时有发生，故有必要加以提示。

7.3.2 预应力混凝土结构的加固设计，除应符合本标准相关规定外，尚应符合国家现行标准《混凝土结构加固设计规范》GB50367、《建筑结构体外预应力加固技术规程》JGJ/T279 的有关规定。

7.3.3 按现场检测结果确定的原结构构件混凝土强度不应低于 C30。结构加固用的混凝土，其强度等级应比原结构、构件提高一级，其性能和质量应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

【条文说明】结构加固用的混凝土，其强度等级之所以要比原结构、构件提高一级，且不得低于 C30，不仅是为了保证新旧混凝土界面以及它与新加钢筋或其他加固材料之间能有足够的粘结强度，还因为局部新增的混凝土，其体积一般较小，浇筑空间有限，施工条件远不及全构件新浇的混凝土。调查和试验表明，在小空间模板内浇筑的混凝土均匀性较差，其现场取芯确定的混凝土强度可能要比正常浇筑的混凝土低 10% 以上，故有必要适当提高其强度等级。

7.3.4 预应力混凝土结构进行加固时，应采取措施卸除或大部分卸除作用在结构上的活荷载。

【条文说明】预应力混凝土结构加固时，应采取措施卸除或大部分卸除活荷载。其目的是控制原构件变形，保障新增部分与原构件或结构的协调工作。

7.3.5 对加固过程中可能出现倾斜、失稳、过大变形或坍塌的预应力混凝土结构，应在加固设计文件中提出相应的临时性安全措施，并明确要求施工单位应严格执行。

7.3.6 采用增大截面法对预应力混凝土构件进行加固，应考虑恒载增加对原结构及基础承载力的影响。

7.3.7 当仅在受压区加固受弯构件时，其承载力、抗裂度、钢筋应力、裂缝宽度及挠度的计算和验算，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 关于叠合式受弯构件的规定进行。当验算结果表明，仅需增设混凝土叠合层即可满足承载力要求时，也应按构造要求配置受压钢筋和分布钢筋。

7.3.8 采用体外预应力加固技术加固预应力混凝土结构时，应综合考虑加固前和加固后的预应力度，保证结构的延性要求。

【条文说明】既有结构为预应力混凝土结构时，体外预应力加固用预应力配筋量确定应考虑既有结构体内预应力配筋，综合考虑总配筋，主要目的是为了控制结构的延性。

7.3.9 采用粘钢板加固预应力混凝土结构时，应根据病害与缺陷所在部位，确定钢板的规格和走向，构件破坏前外贴钢板与混凝土之间应具有较好的粘结性能，保证钢板与被加固构件共同工作。

【条文说明】将钢板粘贴再被加固的预应力混凝土构件受力部位的外边缘，可以充分发挥其强度与作用，同时可以封闭粘贴部位的裂缝和缺陷，约束混凝土变形，有效地提高被加固构件的刚度和抗裂性能。

7.3.10 必要时可采用增大截面法和加设体内预应力张拉法对预应力构件进行加固。

8 预应力钢结构改造与加固

8.1 一般规定

8.1.1 预应力构件及其影响范围内钢构件的加固应按照国家规范本节进行，其他构件的加固应符合国家现行有关标准的相关规定。

8.1.2 预应力钢结构加固应包括预应力构件加固、连接加固、抗连续倒塌加固。

8.2 连接加固

8.2.1 同一受力部位的连接加固，宜采用同一类型的连接方式，不宜采用共同受力刚度相差较大的焊缝与普通螺栓混合连接，可采用共同受力较好的焊缝与摩擦型高强度螺栓混合连接。

【条文说明】 钢结构常用的连接方法中，其连接的刚度，即抵抗变形的能力，依次为焊接、摩擦型高强度螺栓、铆接和普通螺栓连接。一般而言，刚度大的连接很难与刚度小的连接同时受力，而且很容易发生逐个破坏。因此，通常计算时不宜考虑两种不同刚度的连接共同受力。但最新的试验研究表明，在受力较简单明确的接头中，焊缝与摩擦型高强度螺栓在相当程度上可以共同受力，并构成混合连接方式。

8.2.2 用焊接方法补强铆接或普通螺栓连接时，补强焊缝应承担全部荷载。

【条文说明】 考虑铆钉或普通螺栓经焊接补强加固后不能与焊缝共同工作，因此规定全部荷载应由焊缝承受，保证补强安全可靠。

8.2.3 摩擦型高强度螺栓连接的构件用焊接方法加固，考虑栓接和焊接共同作用时，两种连接形式计算承载力的比值应在 1.0~1.5 范围内。

【条文说明】 先栓后焊的高强度螺栓摩擦型连接是可以和焊缝共同工作的，日本、美国、挪威等国以及 ISO 的钢结构设计规范均允许它们共同受力。这种共同工作也为我国的试验研究所证实。虽然我国钢结构设计规范还未纳入这一内容，但考虑在加固这一特定情况下是可以允许的。所以本条作出了可共同工作的原则规定。另外，根据国内的试验研究，加固后两种连接承载力的比例应在 1.0~1.5 范围内，否则荷载将主要由强的连接承担，弱的连接基本不起作用。

8.2.4 用于补强与加固的连接宜对称布置，加固焊缝不宜密集、交叉，在高应力区和应力集中处，不宜布置补强与加固焊缝。

【条文说明】 对称布置主要是使补强或加固的零件及焊缝受力均匀，新旧杆件易于共同工作。其他要求是为了避免加固焊缝对原有构件产生不利影响。

8.2.5 预应力钢结构焊接补强与加固设计应符合现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB

51367的有关规定。

8.2.6 钢结构焊缝补强与加固设计应依据下列技术资料：

- 1 原结构的设计计算书和竣工图，当缺少竣工图时，应测绘结构的现状图；
- 2 原结构的施工技术档案资料及焊接资料，必要时应在原结构构件上截取试件进行测试试验；
- 3 原结构或构件的损坏、变形、锈蚀等情况的检测报告，并应根据损坏、变形、锈蚀等情况确定构件或零件的实际有效截面；
- 4 现场作业条件、待加固结构的实际荷载等资料。

8.2.7 钢结构焊接补强与加固设计，应符合下列规定：

- 1 应采取减小荷载、更改荷载传递路径、完善结构体系、优化连接节点等综合措施，并应减少现场焊接加固量。
- 2 应考虑时效对钢材塑性的不利影响，不应考虑时效后钢材屈服强度的提高值。
- 3 重要部位的薄壁受拉构件和小规格受拉构件，应在卸荷状态下进行补强和加固。

8.2.8 钢结构焊接补强与加固时，节点相连接构件宜在全卸载状态下进行，条件允许时，可将构件拆下补强或加固后再安装；也可在荷载状态下进行，仅卸除作用于待加固结构上的可变荷载和可卸除的永久荷载。

8.2.9 在荷载状态下进行焊接补强与加固施工时，应根据加固时的实际荷载，包括施工荷载，对结构、构件和连接进行承载力验算。当待加固结构实际有效截面的名义应力与其所用钢材的强度设计值之间的比值 β 符合下列规定时，方可进行补强或加固：

- 1 对承受静态荷载或间接承受动态荷载的构件 β 不应大于0.8；
- 2 对直接承受动态荷载的构件 β 不应大于0.4。

8.2.10 荷载状态下焊接补强与加固施工应采取必要的临时支护，并应符合下列要求：

- 1 对结构最薄弱的部位或构件应先进行补强或加固；
- 2 加大焊缝厚度时，必须从原焊缝受力较小部位开始施焊，道间温度不应超过200℃，每道焊缝厚度不宜大于3mm；
- 3 应根据钢材材质，选择相应的焊接材料和焊接方法，并采用合理的焊接顺序和小直径焊材以及小电流、多层多道焊接工艺；
- 4 焊接补强与加固的施工环境温度不宜低于10℃。

8.2.11 对焊缝连接的有缺损构件应进行安全性评估。当缺损严重的构件，不能满足设计要求时，应先对缺损构件采取加固或更换；对一般缺损的构件，可按下列方法进行焊接修复或补强：

- 1 对于裂纹，应查明裂纹的起止点，在起止点分别钻直径为12mm~16mm的止裂孔，彻底清除裂纹后并加工成侧边斜面角大于10°的凹槽，当采用碳弧气刨方法时，应磨掉渗碳层。预热温度宜为100℃~150℃，并应采用低氢焊接方法按全焊透对接焊缝要求进行。

2 对承受动荷载的构件，应在板件受力较小的部位起弧和息弧，并采用连续绕焊施焊，疲劳计算部位的补焊焊缝表面尚需磨平；

3 对于孔洞，宜将孔边修整后采用加盖板或设置套管的方法补强；

4 构件的变形影响其承载能力或正常使用时，应根据变形的大小采取矫正、加固或更换等措施。

【条文说明】对有缺损的钢构件承载能力的评估可根据现行行业标准《钢结构检测评定及加固技术规程》YB 9257 进行。关于缺损的修补方法是总结国内外的经验而得到的。其中裂纹的修补是根据原苏联及国内的实践经验，用热加工矫正变形的温度限制值是参照美国《钢结构焊接规范》AWS D1.1 的规定。

8.2.12 角焊缝补强宜采用增加原有焊缝长度或增加焊缝有效厚度的方法。当负荷状态下采用加大焊缝厚度的方法补强时，被补强焊缝的长度不应小于 50mm，加固后的焊缝应力应符合下式要求：

$$\sqrt{\sigma_f^2 + \tau_f^2} \leq \eta \times f_f^w \quad (8.2.12)$$

式中： σ_f ——角焊缝按有效截面($h_e \times l_w$)计算垂直于焊缝长度方向的名义应力；

τ_f ——角焊缝按有效截面($h_e \times l_w$)计算沿长度方向的名义剪应力；

η ——焊缝强度折减系数；

f_f^w ——角焊缝的抗剪强度设计值。

【条文说明】焊缝缺陷的修补方法是根据国内实践经验提出的。采用加大焊缝厚度和加长焊缝长度两种方法来加固角焊缝都是行之有效的。国外资料介绍加长角焊缝长度时，对原有焊缝中的应力限值是不超过焊缝的计算强度。但加大角焊缝厚度时，由于焊接时的热影响会使部分焊缝暂时退出工作，从而降低了原有角焊缝的承载能力。所以对在负荷状态下加大角焊缝厚度时，必须对原有角焊缝中的应力加以限制。

我国有关单位的试验资料指出，焊缝加厚时，原有焊缝中的应力应限制在 $0.8f_w$ 以内。据原苏联 20 世纪 60 年代通过试验得出的结论是：加厚焊缝时，焊接接头的最大强度损失一般为 10%~20%。

根据近年来国内的试验研究，在负荷状态下加厚焊缝时，由于施焊时的热作用，在温度 $T \geq 600^\circ\text{C}$ 区域内的焊缝将退出工作，致使焊缝的平均强度降低。经计算分析并简化后引入了原焊缝在加固时的强度降低系数 η ，详见现行中国工程建设标准化协会标准《钢结构加固技术规范》CECS 77 的相关规定。本规范引用了这条规定。

8.2.13 焊缝强度折减系数可根据被加固焊缝长度，可按表 8.2.13 采用。

表 8.2.13 焊缝强度折减系数 η

被加固焊缝的长度(mm)	≥600	300	200	100	50
η	1.0	0.9	0.8	0.65	0.25

8.2.14 当预应力钢结构的螺栓、铆钉连接需要更换时，应选用直径比原孔径小 1mm~3mm 的高强度螺栓，连接承载力应满足规范要求。

【条文说明】本条仅指经计算确认，采用直径略小的摩擦型高强度螺栓仍然具有足够强度来承担被换下铆钉所承受的力的情况。

8.2.15 当在负荷状态下拆除原有受力螺栓，增加、扩大螺栓孔时，除应验算原有连接和加固连接的承载力外，还应对板件净截面进行强度验算。

【条文说明】原有螺栓存在松动、残损或连接强度不足而需要更换或新增时，应首先考虑采用相同直径的摩擦型高强度螺栓，若摩擦型高强度螺栓承载力不能满足强度要求时，可考虑改用承压型高强度螺栓。当采用前者时，应合理确定板件间的抗滑移系数；采用后者时，应先将错位不平整的钉孔或螺孔设法扩钻平整，然后用 B 级或 A 级螺栓进行安装，同时还应校核被连接板件的净截面强度。

8.3 预应力钢结构构件加固

8.3.1 预应力钢结构构件加固应包括钢构件的加固和预应力拉索或拉杆加固。

8.3.2 预应力钢结构钢构件的加固应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《钢结构加固设计规范》GB 51367 的相关规定。

8.3.3 预应力钢结构中受压钢构件宜采用套管进行加固。

【条文说明】预应力钢结构中关键受压杆件的稳定性是保障结构服役安全的关键，套管加固技术作为限制失稳技术之一可以用来改善受压杆件的稳定性，同时提升受压杆的承载能力。此外，套管加固数据‘冷加固’技术，避免了焊接技术带来的应力集中现象。

8.3.4 当受压杆件，通过图 8.3.4 所示进行套管加固时，可按下式对其整体稳定进行验算：

$$\frac{e_0 + 2g}{0.6 - P/P_s} \frac{P}{W_{ns}} \leq f \quad (8.3.4.1)$$

式中： P ——为加固后杆件所受轴压力；

P_c, P_s ——分别为既有杆件和加固套管两端铰接情况下的欧拉屈曲临界力；

e_0 ——为加固套管初弯曲幅值，建议取值为 $0.001l_s$ ， l_s 为加固套管计算长度；

g ——为既有杆件与加固套管间的间隙宽度；

W_{ns} ——为加固套管绕截面弱轴的有效截面模量；

f ——加固套管钢材的抗弯强度设计值。

当受压杆件，通过图 6.3.5 所示进行套管加固时，可按下式对其端部稳定进行验算：

$$\frac{P}{A_c} + \frac{\pi P(l_c - l_s)(P_s + P_c)e_0 + (4P_s + 4P_c - 2P)g}{W_{nc}l_s(P_s + P_c - P)} \leq f \quad (8.3.4.2)$$

式中： P ——为加固后杆件所受轴压力；

P_c, P_s ——分别为既有杆件和加固套管两端铰接情况下的欧拉屈曲临界力；

A_c ——为既有杆件有效截面积；

g ——为既有杆件与加固套管间的间隙宽度；

l_c, l_s ——分别为既有杆件和加固套管的计算长度；

e_0 ——为加固套管初弯曲幅值，建议取值为 $0.001l_s$ ；

W_{nc} ——为既有杆件绕截面弱轴的有效截面模量；

f ——既有杆件钢材的抗弯强度设计值。

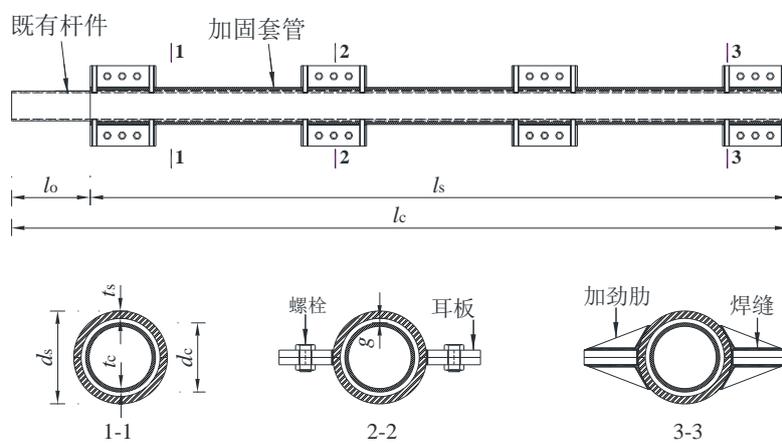


图 8.3.4 套管加固已有抗压杆件

8.3.5 预应力拉索或拉杆的加固应包括有效预应力值调整、新增拉索或拉杆、预应力拉索或拉杆更换等。

【条文说明】对于已建成并运营多年的预应力钢结构，可以通过调整索力改善结构的内力，使其达到或逼近设计理想状态。预应力钢结构中预应力材料缺陷较大、承载力不足时，应采取对其进行更换，同时对结构其他相关索索力、有效应力进行调整，对全结构内力进行优化。

8.3.6 当依据检测和鉴定结果发现预应力钢结构拉索的索力需进行调整时，应符合下列规定。

1 拉索调整前应进行预应力施工全过程模拟计算，计算时应考虑拉索张拉或放松过程对预应力结构的作用及对支承结构的影响，当索力小于设计要求时，应根据拉索的预应力损失情况确定适当的预应力超张拉值。

2 拉索张拉前应确定以索力控制为主或结构位移控制为主的原则。对结构重要部位宜同时进行索力和位移双控制；并应规定索力和位移的允许偏差。

3 张弦网壳结构的拉索张拉，应考虑单索索力调整对其他索的影响。

4 张弦梁、张弦桁架的拉索张拉过程中应保证结构的平面外稳定。

8.3.7 新增索或拉杆应通过构造措施或施工顺序保证新增索与原索共同工作。

8.3.8 当既有拉索/拉杆强度不能满足要求，需进行预应力拉索/拉杆更换时，应符合下列规定：

1 预应力拉索/拉杆更换前应对施工全过程模拟计算，确定合理更换顺序，控制结构内力在允许范围内。

2 预应力拉索/拉杆更换施工应在相关支撑结构缺陷修复或加固完成后进行。

【条文说明】从理论上讲，结构中索（拉杆）预应力的变化导致其他索（拉杆）索力的变化。在更换拉索时，需确切掌握结构运营后、换索前的内力状态，以便确定索力调整方案，在换索的同时达到优化结构内力的目的。各拉索（拉杆）索力调整值必须在承载能力允许范围之内。

8.4 预应力钢结构抗连续倒塌

8.4.1 预应力钢结构抗连续倒塌加固可采用概念设计法、拉结结构法、拆除构件法和局部加强法进行设计。

8.4.2 既有预应力钢结构的抗连续倒塌计算时，钢材及拉索强度可采用实测材料强度的标准值。

【条文说明】钢材强度正截面承载力计算时，可取标准值的 1.25 倍；受剪承载力验算时可取标准值。

8.4.3 预应力钢结构抗连续倒塌加固的概念设计应符合下列规定：

1 应加强拉索的强度，拉索端部采用可靠锚固，避免拉索及拉索锚固失效。

2 应避免钢结构关键杆件及关键节点破坏先于其连接构件的破坏；

3 应避免钢结构构件失效引起其他钢结构构件失效或整体结构失稳。

【条文说明】确保结构的节点、构件和整体稳固性，保证结构有较多的冗余度及备用传力途径、钢索及索端的可靠锚固，是大跨度预应力钢结构抗连续倒塌的重要措施。

8.4.4 预应力钢结构采用拉结结构法进行抗连续倒塌加固设计应符合下列规定：

1 每层均应进行拉结设计，计算构件所需的拉结力（或弯矩）；

2 应根据拉结力（或弯矩）进行拉索规格、拉索索力和钢结构构件截面计算。

8.4.5 预应力钢结构采用拆除构件法进行抗连续倒塌加固设计应符合下列规定：

1 应选取靠近支座处的拉索、中间榀拉索、靠近拉索处的角柱及下部支承结构作为被拆除的构件；

2 宜采用计入大变形的非线性动力方法进行抗连续倒塌计算。

8.4.6 预应力钢结构采用局部加强法进行抗连续倒塌加固设计时，对于特别需要加强的构件，可在其表面施加均布侧向荷载，进行该构件的承载力设计。

附录 A 无粘结预应力筋拉脱法测定有效预应力值

A.0.1 无粘结预应力筋的有效预应力值可按本附录规定的方法进行测定。

A.0.2 无粘结预应力筋的有效预应力值的测定应具备下列仪器：

- 1 加持锚环；
- 2 加持夹片；
- 3 顶紧与张拉件；
- 4 加力筒；
- 5 张拉螺杆；
- 6 千斤顶；
- 7 传感器；
- 8 垫片；
- 9 螺帽。

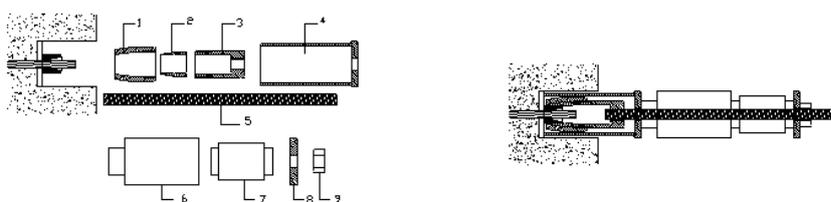


图 A.0.2 预应力混凝土拉脱法检测示意图

A.0.3 张拉检测应按以下流程进行：

- 1 将张拉端锚具周边的混凝土剔除，露出直径不小于 90mm 的区域；
- 2 连接处锚具表面应除锈或清除污物。
- 3 安装夹持锚环，再放入夹持夹片，夹持锚环应离开承压板面约 5mm，便于卸锚；
- 4 将顶紧与张拉件拧入夹持锚环并顶紧夹片，夹持锚环后部有内螺纹，顶紧与张拉件前部有外螺纹，螺纹相互配合；
- 5 将张拉螺杆拧入顶紧与张拉件，并安装加力筒；
- 6 安装穿心式千斤顶、穿心式传感器；
- 7 安装后部垫板并拧紧螺帽；
- 8 千斤顶进油，开始施加拉力，直到原来张拉端锚具开始离开承压板；
- 9 记录拉力-锚具伸长值曲线。

A.0.4 预应力值判断原则应符合下列规定：

- 1 对张拉端锚具施加拉力的同时，测量千斤顶油缸的活动量作为伸长值，该伸长值开始段包括了加力筒的压缩量、张拉螺杆的伸长量、前段夹持锚环及夹片与张拉端锚具间的活动量、顶紧及张拉件的伸长量等；
- 2 当拉力达到预应力钢绞线端部拉力时，锚具开始脱离承压板，预应力筋开始伸长，

伸长量与拉力之间关系会有明显的转折点，转折点的拉力就是预应力筋端部预应力值。

附录 B 混凝土应力释放法测定有效预应力值

B.0.1 无粘结预应力混凝土结构、有粘结预应力混凝土结构均可采用本附录规定的混凝土应力释放法进行有效预应力测定。

B.0.2 混凝土应力释放法预应力结构有效应力的测定应具备下列仪器：

- 1 标距为 80mm 的电阻式应变片以及将应变片粘贴在混凝土表面的粘结剂；
- 2 应变仪及导线；
- 3 混凝土切割机，选取直径为 180mm~200mm 锯片；
- 4 红外温度计。

B.0.3 混凝土应力释放法测定有效应力的步骤：

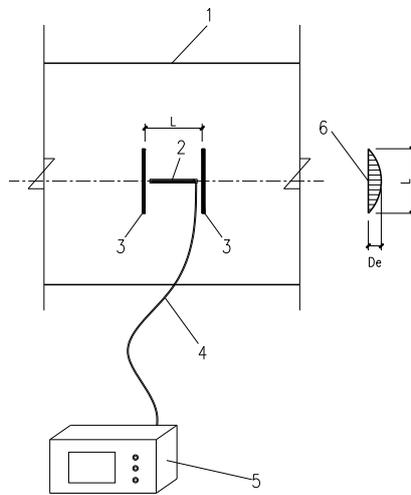


图 B.0.3 混凝土应力释放法检测示意图

1—混凝土梁；2—应变片；3—开槽；4—导线；5—应变仪；6—开槽截面示意

1 对待测预应力混凝土梁，沿梁轴线方向选取弯矩较小的截面，且距离预应力张拉端/锚固端距离应不小于 1 倍梁高；

2 再在梁的高度方向选取梁的中性轴位置（图 B.0.3）作为检测位置；

3 用砂纸将混凝土表面打磨，露出混凝土新的表面；

4 用酒精棉擦拭掉混凝土表面浮尘，沿轴线粘贴混凝土应变片；

5 连接应变仪；

6 从应变片中心向左、右分别为 60mm 位置确定开槽位置，槽的净距 $L=120\text{mm}\pm 2\text{mm}$ ，开槽深度控制在 25mm~35mm，两侧最大深度相差应小于 0.5mm，取两条槽深度的平均值作为计算槽深 D_e ；

7 对应变仪进行调零，用红外温度计测量检测区混凝土表面温度，测量精度不低于 0.2℃；

8 用混凝土切割机在开槽位置进行开槽，开槽过程应采用隔热板遮挡切割机切下混凝土碎末，减小温度对混凝土表面影响；

9 开槽后每隔 1min 测量一下测量区混凝土表面温度，待开槽区域混凝土表面温度与开槽前温度相差不大于 0.5℃，记录混凝土应力释放对应的应变值 ε_{De} ；

B.0.4 根据混凝土应力释放测得的应变 ε_t 和计算槽深 D_e 按下式规定计算混凝土测点应力推测值：

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_{De}}{\gamma_{De}} \quad (\text{B.0.4})$$

式中： σ_c —测点混凝土应力推测值 (N/mm²)；

E_c —混凝土弹性模量 (N/mm²)；

ε_{De} —开槽计算深度为 D_e 时测得的混凝土应力释放对应的应变；

γ_{De} —开槽计算深度为 D_e 时的应力释放率，按本规程第 B.0.5 条采用。

B.0.5 混凝土应力释放法应力释放率 γ_{De} 与开槽计算深度 D_e 之间的关系可按表 B.0.5 采用。

表 B.0.5 应力释放率 γ_{De} 与开槽计算深度 D_e 之间的关系

D_e/mm	15	20	25	30	35	40	45
γ_{De}	0.53	0.70	0.85	0.96	1.05	1.10	1.14

注：中间值按线性差值确定。

B.0.6 根据混凝土应力推测值 σ_c 和测点位置的截面特性，可计算确定有效预应力值。当混凝土构件内有预应力以外的轴向力时，应去除轴力的影响。

附录 C 预应力钢结构性能动力检测

C.0.1 预应力钢结构动力检测的设备和仪器，应符合下列要求：

- 1 如选择激振器激振，尽量选择体积小、重量轻的激振器；
- 2 当采用稳态正弦波激振法进行检测时，宜采用旋转惯性机械起振机，也可采用液压伺服激振器，使用频率范围宜为 0.5Hz~30Hz，频率分辨率不应小于 0.01Hz；
- 3 估计被测量参数的最大值，然后调整仪器的量程，使最大值落在量程的 1/2~2/3 之间，以获得最大信噪比；
- 4 根据实际需要测试的振动参数和振型阶数选择合适的位移计、速度计或加速度计；
- 5 进行瞬态过程检测时，测试仪器的可使用频率范围应比稳态检测时大一个数量级；
- 6 选择仪器的灵敏度，应满足检测工作要求，传感器的横向灵敏度应小于 0.05；
- 7 选择仪器的分辨率，应根据被检测结构的最小振动幅值来选定；
- 8 动态信号测试仪应具备低通滤波，低通滤波截止频率应小于采样频率的 0.4 倍，防止信号发生频率混淆；
- 9 若测试仪器对测试系统质量和刚度有明显的影响，可通过修正方法予以消除。

C.0.2 预应力钢结构动力检测的测试，应符合下列要求：

- 1 测点布置应尽量避免避开振型节点和反节点处；多点激励时，应能较好的反映结构的动力特性，并充分显示结构的模态振型，测点数宜为所测模态阶数的 2 倍；
- 2 结构动力检测时，应保证不产生对结构性能有明显影响的损伤；
- 3 结构动力检测时，应避免环境及系统干扰；
- 4 采用环境激励法检测时，在测量振型和频率时测试记录时间不应少于 5min，在测试阻尼时测试记录时间不应少于 30min；
- 5 当需要多次测试时，每次测试应至少保留一个共同参考点；
- 6 确定传感器的安装方式，安装谐振频率要远高于测试频率。

C.0.3 预应力钢结构动力检测的时域数据处理，应符合下列要求：

- 1 对记录的数据进行零点漂移、记录波形和记录长度的检验；
- 2 被测试结构的自振周期，可在记录曲线上相对规则的波形段内取有限个周期的平均值；
- 3 被测试结构的阻尼比，可按自由衰减曲线求取；当采用稳态正弦波激振法时，可根据实测的共振曲线采用半功率点法求取；
- 4 被测试结构各测点的幅值，应用记录信号幅值除以测试系统的增益，并按此求得振

型。

C.0.4 预应力钢结构动力检测的频域数据处理，应符合下列要求：

- 1 采样间隔应符合采样定理的要求；
- 2 对频域中的数据应采用滤波、零均值化方法进行处理；
- 3 被测试结构的自振频率，可采用自谱分析或傅里叶谱分析方法求取；
- 4 被测试结构的阻尼比，宜采用自相关函数分析、曲线拟合法或半功率点法确定；
- 5 对于复杂结构的测试数据，宜采用谱分析、相关分析或传递函数分析等方法进行分析。

C.0.5 测试数据处理后，应根据需要提供测试结构的自振频率、阻尼比和振型以及动力反应最大幅值、时程曲线、频谱曲线等分析结果。

附录 D 预应力钢结构自振频率检测评定

D.0.1 预应力钢结构的自振频率可通过动力检测得到。

D.0.2 预应力钢结构的自振频率检测宜采用环境激励法，传感器宜采用非接触式传感器，如激光位移传感器。

D.0.3 传感器应符合下列要求：

1 传感器应具备机械强度高、安装调节方便、体积重量小且便于携带、防水、防电磁干扰等性能；

2 传感器的布置应尽量避免开振型节点，合理显示结构的振型形态；

3 传感器的灵敏主轴方向应与测量方向一致；

4 传感器宜放置在安全的地方，尽量布置在可避开人为干扰的位置，附近应防磁、防局部振动。

D.0.4 测试得到的结构振动信息，宜采用峰值拾取法与随机子空间法相结合的方法进行分析。

D.0.5 为剔除外界干扰频率的影响，结构自振频率的检测宜依据以下方面进行综合分析判定：

1 由所记录的时域振动曲线经傅里叶变换后的功率谱函数出现陡峭峰值的位置；

2 振动模态符合理论振动模态的位置。

D.0.6 采用激光非接触式速度采集设备时，待测点与激光发射接收设备的距离不宜大于 50 m，且激光发射接收设备不宜处于待测预应力钢结构拉索竖直平面内。

D.0.7 激光测试时采样频率不应低于待测结构理论基频的 10 倍。

D.0.8 对激光采集的速度时程数据进行频谱分析时，宜采用傅里叶变换、经验模态算法、变分模态算法等多种分析方式，对提取频率进行验证。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 《钢结构设计规范》 GB 50017
- 《工业建筑防腐蚀设计标准》 GB 50046
- 《建筑结构可靠度设计统一标准》 GB 50068
- 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 《工业建筑可靠性鉴定标准》 GB 50144
- 《混凝土结构试验方法标准》 GB/T 50152
- 《混凝土质量控制标准》 GB 50164
- 《构筑物抗震设计规范》 GB 50191
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB50204
- 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 《民用建筑可靠性鉴定标准》 GB 50292
- 《建筑结构检测技术标准》 GB 50344
- 《混凝土结构加固设计规范》 GB 50367
- 《建筑结构加固工程施工质量验收规范》 GB 50550
- 《钢结构现场检测技术标准》 GB/T 50621
- 《钢结构焊接标准》 GB 50661
- 《混凝土结构现场检测技术标准》 GB/T 50784
- 《高耸与复杂钢结构检测与鉴定标准》 GB 51008
- 《核电厂建构筑物维护及可靠性鉴定标准》 GB 51323
- 《钢结构加固设计规范》 GB 51367
- 《厚钢板超声检测方法》 GB/T 2970
- 《预应力筋用锚具、夹具和连接》 GB/T 14370
- 《预应力混凝土用钢材试验方法》 GB/T 21839
- 《城市桥梁养护技术标准》 CJJ99

《城市桥梁检测与技术评定技术规范》CJJ/T 233
《空间网格结构技术规程》JGJ 7
《建筑变形测量规程》JGJ/T 8
《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85
《预应力混凝土结构抗震设计规程》JGJ 140
《混凝土中钢筋检测技术规程》JGJ/T 152
《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161
《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》JGJ/T411
《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21
《钢结构预应力技术规程》CECS 212