

第一章

公路钢筋混凝土桥梁病害调查与机理分析

第一节 概 述

近年来的经济发展反映在公路运输上，表现为交通量猛增，载重量增大。由于设计标准的改变，载重能力的提高，使得许多已建桥梁的承载力变得偏低，桥面变窄，线型不良。

现将造成桥梁结构可靠性降低的主要原因简介如下。

1. 公路车辆的超限运输

在发展公路超限运输、提高公路货运车辆经济效益的同时，存在着大量提高公路运输车辆轴载重量、总质量以及外形尺寸限值标准的现象，即超载运输，给处于道路咽喉的桥梁增加了额外的载重负担，对桥梁的安全性构成巨大的威胁。

2. 结构的老化与病害

由于结构所处外界环境的影响而产生的老化与病害，在此主要指因混凝土碳化和裂缝开展引起的钢筋锈蚀，从而造成的钢筋力学性能改变、混凝土的强度随时间改变，以及由此引起的混凝土与钢筋间的粘结能力降低等。老化和病害使结构的承载能力降低，安全性下降。究其产生的原因，除了自然老化外，更主要是由于施工质量差、材料强度下降及长年失修、恶劣的运营条件。

3. 设计标准的演变

在我国许多建于 20 世纪 60 年代的桥梁目前仍在正常运营。这意味着依据旧规范设计的桥梁承担着新规范规定的增大的设计荷载，超载现象是客观存在的。在设计方法的发展和设计标准的不断细化过程中，虽然能保证前后规范在安全性方面的合理衔接，但其中存在些许差异也是难免的。1974 年以前我国尚无高速公路，也不存在汽车专用公路与一般公路的区别，但随着公路网的重新划分，必然造成部分公路等级的提高，从而造成桥梁承担的荷载等级也会相应提高，并因此影响到桥梁结构的安全性。这是进行桥梁评估的最主要的原因。仅从一般公路规定荷载的比较，就足以说明新旧规范的荷载差异（在此给出的是 1974 年规范和 1985 年规范间的荷载差异）。

JTJ023—85 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定的荷载见表 1-1。

另外，该规范还规定：人群荷载：一般情况下为 $300\text{kgf}/\text{m}^2$ ，密集情况下为 $350\text{kgf}/\text{m}^2$ 。两车道的情况下：荷载不折减。

表 1-1 1985 年规范规定的荷载

公路等级	汽车专用公路			一般公路		
	高速公路	一	二	二	三	四
计算荷载	汽车—超 20 级	汽车—超 20 级 汽车—20 级	汽车—20 级	汽车—20 级	汽车—20 级	汽车—10 级
验算荷载	挂车—120	挂车—120	挂车—100	挂车—100	挂车—100	履带—50
		挂车—100				

《公路桥涵设计规范》（1974 年）规定的荷载见表 1-2。

表 1-2 1974 年规范规定的荷载

公路等级	一	二	三	四
计算荷载	汽车—超 20 级	汽车—20 级	汽车—15 级	汽车—10 级
验算荷载	挂车—100	挂车—100	挂车—80	履带—50

同时规定，汽车—15 级的验算荷载也可用挂车—100 级。人群荷载：一般情况下为 $250\text{kgf}/\text{m}^2$ ，密集情况下为 $350\text{kgf}/\text{m}^2$ 。两车道的情况下：荷载折减 10%。

4. 意外碰撞

结构在使用过程中，由于意外碰撞引起的结构构件断裂、失稳或变形过大而没有及时修复或更换，常常会影响相邻构件的承载能力。构件裂缝的开展会导致构件的抗力下降。这种情况下构件承载力的评估需通过现场检测，然后根据测量结果验算确定。此情况属偶然现象，故在本书中不予涉及。

旧桥承载力不足、老化、破损是个世界性范围的问题，越是工业发达的国家，如美、日、西欧和北欧等，这一问题就越严重。

美国 20 世纪 80 年代初的调查显示，全国共有 566000 座公路桥梁。在调查报告中叙述了 514000 座桥梁，其中有 40% 以上桥梁都有不同程度的损坏，98000 座桥梁结构强度降低，只能停止或限载通行，102000 座桥梁行车道太窄，桥下净空不够或承载力不足。由于桥梁陈旧老化、失修，塌桥事故不断发生。

原联邦德国曾于 70 年代末对一个州的 1500 座钢筋混凝土和预应力混凝土公路桥做了全面检查。结果发现，钢筋混凝土桥：桥龄在 50~60 年的，有 27% 的桥梁至少有一处严重损伤，64% 至少有一处重要损伤，77% 至少有一处中等损伤；桥龄在 30~35 年的，有 13% 的桥梁上部结构至少有一处严重损伤，37% 至少有一处重要损伤，53% 至少有一处中等损伤；桥龄在 20~30 年的，有 8% 的上部结构至少有一处严重损伤，24% 至少有一处重要损伤，46% 至少有一处中等程度损伤。预应力混凝土桥的损伤情况比钢筋混凝土桥更严重，20~30 年桥龄的预应力混凝土桥，有将近 50% 的桥梁上部构造至少有一处重要损伤，其中 2/3 至少有一处中等损伤。

日本、北欧、西欧甚至印度等国也都对本国的公路桥梁状况进行了调查统计，对承载力较低的桥梁进行了加固，对一些旧桥进行了加宽。

我国的公路桥梁虽然大部分是新中国成立以后兴建的，但部分桥梁的桥龄也已达 40 余年。根据 80 年代和近年的几次公路调查结果，已有相当数量的桥梁发生了不同程度的老化、损坏，危桥的数量逐年增长。特别是 50 年代和 60 年代建造的一些桥梁，普遍存在着因设计荷载较低，承载力不足，桥面过窄和老化、破损、裂缝等问题。还有一部分桥梁因受意外荷载的作用或周围环境的变化如撞击、河道疏浚，洪水冲击桥下或桥旁的挖掘等而引起损害。这些桥梁不能正常使用，必须限重、限载通行，有些桥梁甚至不得不关闭交通。只有加固补强，使其恢复设计承载能力或提高荷载标准后才能运行。

为确保公路交通的正常运行，必须保证桥梁的承载能力、通行能力及良好的工作状况。要做到这一点，需要做的工作很多。首先要对现有的桥梁进行调查、检测，在此基础上，对桥梁进行评估。然后再进行有效的维修加固。

目前的评定标准主要有：以可靠度理论为基础的可靠性评定标准；以模糊数学及专家系统理论为基础的评定标准；以专家经验为基础的构件缺损状况分级评定标准。

我国现行《公路养护技术规范》采用的是第三类方法。这类方法目前主要有两种：一是对桥梁各分部结构缺损状况进行分级评定，然后按缺损最严重的评定等级作为整个桥梁的缺损等级；二是根据桥梁各构件或各分部结构的缺损状况进行评分，然后依据其相对重要性给定权重进行叠加，从而得出整个桥梁的评分值。

由于在需要加固的桥梁中，钢筋混凝土桥梁数量最多，地位最重要，本书将重点论述钢筋混凝土桥梁的可靠性评估与加固技术。

第二节 公路钢筋混凝土桥病害调查分析

一、病害的概念

GB/T 50283—1999 《公路工程结构可靠度设计统一标准》规定公路工程结构必须满足下列功能要求：

- (1) 在正常施工和正常使用时，能承受可能出现的各种作用。
- (2) 在正常使用时，具有良好的工作性能。
- (3) 在正常维护下，具有足够的耐久性能。
- (4) 在预计的偶然事件发生时及发生后，仍能保持必需的整体稳定性。

凡由于人为的（勘察、设计、施工、使用等）或自然的（地质、风雨、冰冻等）原因，使桥梁结构出现不符合上述规范和标准要求的一些问题和现象，统称桥梁结构的病害。按照不同的严重程度可分为四类：

(1) 完好或基本完好：桥梁结构基本满足上述要求，与建造时比基本没有可观测到的病害。

(2) 轻微损伤的病害：这类病害并不影响结构的承载力、刚度、完整性及其使用功能，但要消除由于它们造成的损伤则需要额外的费用，有时还要在使用过程中对结构作系统的观察。例如，勾缝脱落、混凝土轻微剥落等。

(3) 一般性损伤的病害：这类病害虽不一定影响结构应有的承载力，但却使它们的使用性能下降，维护费用增大，有时还影响观感，使人们有不安全感。如钢筋混凝土梁挠度过大、出现肉眼可见裂缝、基础发生整体沉降等。

(4) 严重性损伤或破坏性损伤的病害：这类病害往往表现为所采用的材料强度不足，或者构件残缺有伤，或者所选取的构件截面尺寸不够，或者所安装的连接构造质量低劣或使用环境恶劣，如超载、撞击等。如由于混凝土强度不足造成梁支座处剪切裂缝，梁、板通缝，基础发生过大不均匀沉降等，以至威胁到构件甚至整个结构的承载力和稳定性。这类病害如不及时消除，就有可能迅速导致局部结构甚至整个结构的破坏，而修复这类病害则一般要耗费巨额资金，有些甚至无法修复，必须推倒重建。

除第一类外，其余三类病害可能是显露的，如混凝土漏振拆模后发现大面积空洞，毛石砌体出现通缝等；也可能是隐蔽的，如埋设在混凝土中的钢筋位置有错，砌体强度不足等。隐蔽的病害尤其危险，因为它们有着良好外表的假象，不易被察觉，一旦这些病害导致结构发生破坏就会带来严重后果。

二、各分部结构的病害分类

桥梁病害的定义一般都由定性标准和定量界限两部分组成。定性标准从病害的形状和表象上进行界定，以从外观上将病害明显区别开，它是确定病害种类的主要依据；定量界限是从便于检查和处理的角度出发人为确定的界限。病害的界定以有利于指导道班养护生产为主，以客观反映现有钢筋混凝土梁桥的实际状况即实际服务水平为原则。

1. 翼墙、耳墙

翼墙或耳墙的病害是指桥台两侧翼墙的病害，包括开裂、倾斜、滑移、沉降等使翼墙、耳墙降低或丧失挡土能力的状况，见表 1-3。

表 1-3 翼墙、耳墙病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、长满树木杂草、块石松动	冻融、下沉滑动、严重剥落、严重开裂	大贯通缝、有倾覆危险、翼墙断裂、人为拆除

2. 锥坡、护坡

锥坡、护坡的病害是指两桥台周围的锥形护坡和台前溜坡的病害，包括冲刷、滑塌、沉陷、草木丛生等现象，见表 1-4。

表 1-4 锥坡、护坡病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		长满树木杂草、局部缺损、松动、塌陷	大部分松动、大部分缺损、空洞裂缝	严重缺损、整体或局部下滑

3. 墩（台）身

墩（台）身的病害包括墩（台）身表面的各种缺损，如裂缝宽度超过容许值、下沉、

倾斜、滑动、剥落露筋等，见表 1-5。

表 1-5 桥墩（台）身病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、蜂窝麻面、少量裂缝超容许值	较严重风化酥松、网裂、局部松动、整体下沉、柱空洞	梯形或横竖贯通缝、主筋暴露、翼墙与前端分离有倾覆危险、严重不均匀沉降、位移、倾斜

4. 墩（台）基础

墩（台）基础的病害是指河床冲刷和腐蚀对基础造成的病害，包括风化、剥落露筋、发生不许可的冲刷或淘空等现象，见表 1-6。

表 1-6 桥墩（台）基础病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、露基，但未露底，局部冲毁剥落	桩基被冲、直径减小、露筋，混凝土严重风化剥落，大部分偏位，局部露筋锈蚀严重	浅基冲空露出底面，基础不均匀沉降，基础淘空墩台身塌裂变形

5. 盖梁、墩台帽

盖梁、墩台帽的病害是指桥墩上或排架的盖梁、墩台帽的病害，包括表面的各种缺损、露筋、锈蚀、局压破坏等状况，见表 1-7。

表 1-7 盖梁、墩台帽病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、露筋，蜂窝麻面，轻微渗漏	混凝土大面积退化、酥裂，混凝土局部压碎破裂，局部出现压裂缝	主筋大面积露筋、锈蚀，混凝土严重缺损、有落梁危险

6. 支座

支座的病害是指支座出现老化、破裂、破碎、错位、倾斜、脱空等导致其功能出现缺陷的现象，见表 1-8。

表 1-8 支座病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		个别滑动面干涩，个别轻微锈蚀，轻微老化	位置严重偏离、致使梁端支承不稳，大部分石垫块压碎	大部分老化坏死、失去功能，丢失

7. 上部主要承重结构

上部承重结构的病害是指桥梁的主要受力构件如梁、板的病害，包括裂缝、风化、剥落、露筋锈蚀等现象，见表 1-9。

表 1-9 上部主要承重结构病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、梁腹蜂窝麻面、少量裂缝超容许值	混凝土剥落露筋锈蚀、梁腹混凝土酥裂剥落、梁板挠度过大	大部分板露筋、梁多处露筋、腹板竖向裂缝、板头混凝土破碎或断掉、板支点处竖向裂缝、梁支座附近梁体开裂、板头 45°斜裂缝、沿主筋较大纵裂、横隔板失去联系、过车有异常响动

8. 上部一般承重结构

上部一般承重结构的病害是指非主要承重构件如横隔梁和其他构造需要的构件的病害，包括裂缝、风化、剥落、露筋锈蚀等现象，见表 1-10。

表 1-10 上部一般承重结构病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微缺陷损坏、蜂窝麻面、混凝土轻微剥落、少量裂缝超容许值	混凝土有部分风化酥松、帽石外移、挑梁有局部压碎	主筋暴露、严重贯通缝

9. 调治构造物

调治构造物的病害是指桥位附近为保护桥梁和桥头引道、河岸的安全和稳定而修建的防洪、防冲等防护措施的病害，包括剥落、草木丛生、砌体松动缺损、下滑、沉陷等现象，见表 1-11。

表 1-11 调治构造物病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、长满杂草堆满垃圾、砌体局部松动、局部缺损	露基但未露底、下滑位移沉陷	基础淘空、截水墙冲毁、大部分缺损功能不良、严重残缺丧失防护功能

10. 桥面铺装

桥面铺装的病害主要包括桥头跳车、坑槽、裂缝（纵横缝、网裂）、波浪变形等现象，见表 1-12。

表 1-12 桥面铺装病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		局部损坏面层松散坑洼、有波浪变形、桥头跳车	大部分桥面有线状裂缝、拥包和凹陷、局部露筋、不规则纵横缝	严重纵裂、人为大空洞、大部分桥面破碎严重泛油打滑积水、严重网裂大部分桥面有坑槽

11. 伸缩缝

伸缩缝的病害主要包括脱落、渗漏、不平跳车、严重缺损等情况，见表 1-13。

表 1-13 伸缩缝病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微渗漏、轻微不平跳车	严重不平跳车、钢板松动	U形板堵死、缝内沥青严重挤出、桥面板缝卡死、搭桥缝上层钢板损坏、失去伸缩功能、淤积

12. 人行道

人行道的病害包括撞击、断裂、错位、缺件、剥落、锈蚀等，见表 1-14。

表 1-14 人行道病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、个别块件破裂塌陷	多处破裂塌陷、局部露筋	底部混凝土大面积剥落露筋、大部分残缺、人行道板断裂

13. 栏杆

栏杆的病害指桥梁两侧栏杆和护栏的病害，包括撞击、断裂、错位、缺件、剥落、锈蚀等，见表 1-15。

表 1-15 栏杆病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		轻微剥落、个别杆件松动或丢失、扶手栏杆变形、局部残缺、外移、个别裂缝	多处明显损坏、有倾斜裂缝多处	大部分残缺，危及人身安全

14. 排水系统

排水系统的病害指桥上的纵横坡、泄水孔、泄水管等的病害，包括坡度不适、积水、堵塞、排水沟损坏等情况，见表 1-16。

表 1-16 排水系统病害分类

病害类型	完好	轻微损伤	一般损伤	严重或破坏损伤
病害特征		个别不畅	较多不畅	大部分堵塞，排水不畅

三、调查结果分析

1. 钢筋混凝土梁桥病害状况

根据笔者近年对某地区桥梁状况所做的调查结果，88座桥梁共有585处病害，其中轻微损伤的病害266处，一般性损伤的病害167处，严重或破坏性损伤的病害152处，分别占总病害数的45.47%、28.55%、25.98%。说明主要病害形式是轻微损伤，而一般损伤、严重或破坏损伤也占相当大的比重。总体说来，钢筋混凝土桥梁的各种病害（损伤）

已十分严重，已严重危及桥梁安全、缩短了桥梁寿命，衰减了其预定功能。

根据调查结果，存在严重病害的占 25.98%，比较严重病害的占 28.55%，轻微病害的 45.47%，需要分别采取更新、部分更新与大修措施。这些桥梁几乎全部是国道、省道上的桥梁，交通量比较大，负荷较重，形式十分严峻。目前完全整修、加固好这些桥梁需要大量的资金。

2. 病害的主要形式是轻微损伤

在钢筋混凝土桥梁中，最常见的病害是轻微损伤，包括轻微剥落（如砌体部分勾缝剥落、墩台身冲蚀剥落、混凝土结构因风化冻胀引起的表面剥落等）、局部松动塌陷损坏残缺（如翼墙块石松动塌陷、锥坡块石松动塌陷等）、蜂窝麻面（如混凝土梁板因施工原因引起的蜂窝麻面等）、少量裂缝超容许值（如混凝土梁因超载而出现的裂缝等）等现象。产生的主要原因：由于施工质量差、材料强度低，致使桥梁的抵抗能力弱；由于常年失修的恶劣运行条件，加快了这种病害的迅速发展及蔓延。

3. 对相对次要的结构重视不够

将桥梁划分为四个体系：桥面系、上部结构、下部结构、其他部分。桥面系包括：桥面铺装、伸缩缝、排水系统、栏杆及扶手、人行道；上部结构包括：上部主要承重结构、上部一般承重结构；下部结构包括：支座、墩台身、墩台基础、盖梁及墩台帽；其他部分包括：翼墙、锥坡、调治构造物。各部分的病害数分别为 195、89、121、180，分别占总病害数的 33.33%、15.21%、20.68%、30.77%。不难看出，桥面系和其他部分的病害都达到了 30% 以上，是产生病害的主要部位，而我们平时比较重视的上部结构和下部结构分别为 15.21% 和 20.68%，远远小于前两者。说明钢筋混凝土桥梁的病害主要发生在桥面系和其他部分，我们的养护工作也应该对桥面系和其他部分加以重视，当然对上部结构和下部结构也不能放松，因为如果它们发生破坏，后果将是致命的。但日常养护则应该对桥面系和其他部分有所倾斜，使桥梁能够更好地完成其预定功能。

4. 结构及主体安全性降低是普遍严重的病害

桥梁结构断裂、构件失稳和失去功能为主的病害占 25.98%，如果加上局部破损和部分抗力不足引起的裂缝，使这类严重的病害超过了 50%，成为普遍严重的病害内涵。这类病害主要是由于设计考虑不周、施工质量差、材料强度低、基础不均匀沉降等原因引起的，直接关系到桥梁的安全度。

5. 桥梁病害已经直接导致其目标功能的衰减

据资料调查，由于桥梁病害涉及桥梁安全性的降低，许多桥梁只能限载运行，从而降低了正常功能。钢筋混凝土桥梁群体功能衰减已十分严重，如考虑潜在的寿命衰减，可能还要更严重一些。

第三节 钢筋混凝土桥梁病害机理分析

一、病害的主要形式

钢筋混凝土桥梁的病害主要有以下几种形式。

1. 裂缝

裂缝是钢筋混凝土桥梁中最普遍、最常见的病害之一，不产生裂缝的桥梁几乎没有，而且裂缝往往是多种因素联合作用的结果。裂缝对钢筋混凝土桥梁的危害程度不一，严重的裂缝如贯通缝、网裂等将会严重危及桥梁的安全运行。另外裂缝往往也会引起其他病害的发生与发展，如钢筋锈蚀、冻融破坏等，这些病害与裂缝形成恶性循环，会对桥梁的耐久性产生很大的危害。裂缝种类如下：

(1) 超载裂缝：由于交通运输的发展以及设计、施工等方面的原因，大部分钢筋混凝土桥梁处于超载运行状态，使结构上的作用超过了其抗力，出现了此类裂缝，包括局压裂缝、弯曲裂缝、剪切裂缝。

(2) 不均匀沉降引起的裂缝。

(3) 网裂：混凝土出现不规则裂缝。

(4) 钢筋锈蚀引起的裂缝。

(5) 碱骨料反应裂缝。

2. 混凝土碳化及钢筋锈蚀

混凝土碳化及钢筋锈蚀现象在钢筋混凝土桥梁中比较普遍，也比较严重。调查表明，当碳化深度接近或超过混凝土的保护层厚度时，混凝土结构内的钢筋多已锈蚀。但凡裂缝较多、混凝土质量较差的桥梁，其钢筋锈蚀程度也就必然严重，产生的顺筋裂缝也特别多。

3. 剥蚀

剥蚀是从混凝土的外观破坏形态着眼，对混凝土桥梁结构表面混凝土发生蜂窝麻面、露石、酥松起皮和剥落等病害的统称。根据不同的机理可分为冻融剥蚀、冲磨和空蚀、水质侵蚀、风化剥蚀等。

4. 结构构造的破坏

在钢筋混凝土桥梁中，由于结构的关键部位构造不合理、施工过程中存在问题或年代久远等而引起的结构构造老化、失稳、变形过大等已在一定程度上影响了桥梁的安全运行。

5. 地基不均匀沉降引起的破坏

由于地基不均匀沉降引起的破坏对结构的影响也比较大，如翼墙和锥坡的下沉、滑动、开裂，毛石墩台的贯通缝等。

6. 人为破坏

人为因素也是导致结构功能丧失的一个重要因素，有时造成的破坏是非常严重的以至于结构的某项或几项功能完全丧失，主要有撞击、人为拆除等。

二、病害的机理分析

1. 裂缝

当混凝土中拉应力大于其抗拉强度或拉应变大于其极限拉应变时，混凝土会产生裂缝。混凝土产生裂缝的主要原因见表 1-17。

表 1-17 混凝土产生裂缝的主要原因

大的方面	分类	因素	原因
材料	原材料	水泥	水泥的非正常凝结，水泥的水化热，水泥的非正常膨胀
		骨料	骨料中含泥土，骨料质量低劣，使用了反应性骨料
	混凝土		混凝土中的氯化物，混凝土的沉缩及泌水，混凝土的干缩
施工	混凝土	拌和	掺和料拌和不匀，搅拌时间过长
		运输	泵送时改变了配合比
		浇筑	浇筑顺序不合适，浇筑速度太快
		振捣	振捣不足或漏振
		养护	硬化前受到振动或加载，初期养护时急躁干燥，初期冻害
	钢筋		钢筋位置被扰动，保护层厚度不够
	模板	模板	模板变形，模板漏浆或底部渗水，过早拆模
	支撑	支撑下沉	
运行与环境	物理方面	温湿度	环境湿度的变化，构件两面的温湿度相差较大，反复冻融
	化学方面	化学作用	酸或盐类的化学作用，碳化引起的内部钢筋锈蚀，氯化物侵入使内部钢筋锈蚀
结构及外力	荷载	基本荷载组合	运行中的荷载在基本荷载组合内，运行中的荷载超过基本荷载组合
		特殊荷载组合	运行中的荷载在特殊荷载组合内，运行中的荷载超过特殊荷载组合
	结构设计		断面及钢筋用量不足，混凝土标号低，钢筋接头、锚固、构造等设计不当
	支承条件		结构不均匀沉降，冻胀作用
	其他	其他	

(1) 超载裂缝：

1) 局压裂缝：当设计的混凝土抗压强度不够或超载使用时，在承压应力大的部位，由于出现局部拉应力，常常导致产生局压裂缝，甚至会局部压碎。特征：在局压区出现大体与压力方向平行的多条短裂缝。临近破坏前，裂缝加密、混凝土压酥，或发生一条集中开展的主裂缝、混凝土劈裂。

2) 弯曲裂缝：当受拉区拉应力超过混凝土抗拉强度时往往出现弯曲裂缝。特征：弯矩最大截面附近从受拉区边缘开始出现横向裂缝，逐渐向中和轴发展；用螺纹筋时，裂缝间可见短向次裂缝。临近破坏时，横向裂缝向压区延伸，压区出现短而密的纵向裂缝，压区混凝土和箍筋间纵向受压筋外鼓；梁高较大的 T 形或 I 形梁中，次裂缝可发展成与主裂缝相交的枝状裂缝。

3) 受剪裂缝：特征：分两种情况，当箍筋适当时，沿梁端中下部发生约 45° 方向相

互平行的斜裂缝；临近破坏时，斜裂缝发展至梁顶部，同时沿梁下主筋发生斜脚裂缝。当箍筋太密时，沿梁端腹部发生大于 45° 方向的短而密的斜裂缝；临近破坏时，斜裂缝处混凝土酥裂

[实例 1-1] 某钢筋混凝土简支 T 形梁桥建于 1982 年，设计荷载汽—15 验算荷载挂—80。由于施工原因造成混凝土强度不足，导致使用中盖梁悬臂端混凝土局部压碎剥落。

[实例 1-2] 某钢筋混凝土 T 形梁桥建于 1988 年，设计荷载汽—20、验算荷载挂—100。主梁表面分布有大量裂缝，裂缝主要分布在跨中区段和支点附近，从裂缝的形状和表面特性判断，这些裂缝多为活动性结构受力裂缝和沿梁长方向混凝土胀裂裂缝。检查表明，梁底下缘的纵向开裂相当严重，基本上分布在全桥的各片主梁上；最大的胀裂宽度达 0.5mm，由于胀裂的影响，导致多处混凝土破碎、脱落和酥松。在跨中附近的裂缝宽度一般在 0.07~0.20mm 之间，裂缝间距一般在 30~40cm 之间，裂缝高度一般超过梁高的一半。在梁支点附近，基本上每片梁存在 1~2 条的自梁底沿 45° 角向支点方向延伸的临界裂缝和向跨中方向延伸的活动性剪切裂缝，其宽度一般在 0.15mm 左右，垂直高度大于 1/2 梁高。在梁腹中部分散有少量干缩裂缝超过 2/3 梁高同时，梁腹表面分布约占径向裂缝 30% 左右的枣核状干缩裂缝，梁翼板根部存在有沿长度方向的开裂。有裂缝的梁约占梁总数的 60%，尤以边梁严重

(2) 不均匀沉降引起的裂缝：这类裂缝宽度较大，往往在节点处易产生，常见于双柱或多柱框架式墩台。特征：框架梁两端发生裂缝的方向相反（一端自上而下，另一端自下而上），下沉柱上的梁柱接头处可能发生水平裂缝

(3) 网裂：当混凝土出现纵横相交的不规则裂缝时，称为网裂或龟裂。主要有以下情况：

1) 混凝土搅拌、运输时间过长：混凝土搅拌、运输时间过长，使水分蒸发，引起混凝土浇筑时坍落度过低，使混凝土出现不规则的网状裂缝。

2) 初期养护不当：混凝土初期养护时，由于浇水不足或不及时或遇大风天气施工，混凝土表面急骤干燥，出现塑性收缩状态，会在混凝土表面产生不规则裂缝，一般深度较浅

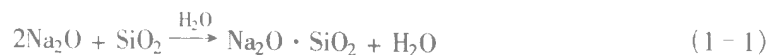
3) 骨料中含土过多：骨料中含土过多会使混凝土随着干燥而产生不规则网状裂缝，并使混凝土的强度降低

[实例 1-3] 某钢筋混凝土简支板桥建于 1970 年，桥面铺装为水泥混凝土，由于施工质量不好导致大部分桥面出现严重网裂

[实例 1-4] 某钢筋混凝土简支板桥建于 1958 年，桥面铺装为水泥混凝土，由于初期养护不当出现严重网裂，未进行修补，导致桥面多处坑槽，接近松散，破坏已相当严重

(4) 钢筋锈蚀引起的裂缝 混凝土中钢筋发生锈蚀后，其锈蚀产物氢氧化铁的体积比原来膨胀 2~4 倍，从而对周围混凝土产生膨胀应力。当膨胀应力大于混凝土抗拉强度时，就会产生裂缝，这种裂缝称为钢锈裂缝。钢锈裂缝一般都为沿钢筋长度方向发展的顺筋裂缝

(5) 碱—骨料反应裂缝：碱—骨料反应一般是指水泥中的碱和骨料中的活性氧化硅发生反应，生成碱—硅酸盐凝胶并吸水产生膨胀压力，致使混凝土出现开裂现象：



碱—硅酸盐凝胶吸水膨胀的体积约增大 3~4 倍，膨胀压力约为 3.0~4.0MPa。碱—

骨料反应通常进行得很慢，所以由碱骨料反应引起的破坏往往经过若干年后才会出现碱—骨料反应裂缝不同于常见的混凝土干缩裂缝和荷载引起的超载裂缝，这种裂缝的形貌及分布与钢筋限制有关，其破坏特征为：当钢筋限制力很小时，表面混凝土产生杂乱无章的网状裂缝，并在缝中伴有白色浸出物，或者在骨料颗粒周围出现反应环；当钢筋限制力强时则出现顺筋裂缝。

发生碱—骨料反应的必要条件是水泥中含有较高的碱量，而同时骨料中含有活性氧化硅。当水泥中的 Na_2O 含量大于 0.6% 时，就会与活性骨料发生碱—骨料反应而产生膨胀。

活性骨料有蛋白石、玉髓、石鳞石英、方石英、酸性或中性玻璃体的隐晶质火山岩，如流纹岩、安山岩和凝灰岩等，其中蛋白石质的二氧化硅活性最大。

碱—骨料反应的必要条件是水分。干燥状态是不会发生碱—骨料反应的，所以混凝土的渗透性同样对碱—骨料反应有很大的影响。

[实例 1-5] 某钢筋混凝土筒支板桥建于 1960 年，桥面铺装为水泥混凝土，后发现大部分桥面出现严重网裂，在裂纹处钻芯取样，在显微镜下观察，发现内部有许多网状裂缝，再进行岩相分析，发现含有典型的活性矿物玉髓和微晶石英。因此，此桥面的网裂可视为碱—骨料反应引起的。

2. 混凝土碳化及钢筋锈蚀

混凝土碳化及钢筋锈蚀现象在桥梁中比较普遍、也比较严重。调查表明，当碳化深度接近或超过混凝土的保护层厚度时，混凝土内的钢筋已锈蚀。凡是裂缝多、混凝土质量差的桥梁，其钢筋锈蚀程度也必然严重，产生的顺筋裂缝也特别多。由于混凝土保护层碳化或氯离子侵蚀引发的钢筋锈蚀被称为钢筋混凝土结构的“癌症”，潜伏期长，病发初期没有任何征兆，及至发现顺筋裂缝、混凝土保护层崩落等病害特征时，钢筋锈蚀已处于加速期或破坏期。

(1) 混凝土的碳化机理：混凝土的碳化是介质与混凝土相互作用的一种很广泛的形式，最典型的例子是大气中的二氧化碳气体 (CO_2) 对混凝土的作用。在工业区，其他酸性气体如二氧化硫 (SO_2)、硫化氢 (H_2S) 等也会引起混凝土“碳化”（准确的说是中性化）。大气中的 CO_2 与水泥水化物中的氢氧化钙 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] 发生化学反应：



严格地讲，碳化反应不限于水泥水化物中的氢氧化钙，在其他一些水泥水化物或未水化物中也会发生其他类型的碳化反应，但是氢氧化钙的碳化影响最大。

由于混凝土碳化的结果，混凝土的凝胶孔隙和部分毛细管可能被碳化产物碳酸钙 (CaCO_3) 等堵塞，混凝土的密实性和强度会因此有所提高。但是，由于碳化降低了混凝土孔隙液体的 pH 值（碳化后 pH 值约为 8~10），一旦碳化达到钢筋表面，钢筋就会因其表面的钝化膜遭到破坏而产生锈蚀。

混凝土的碳化主要包括三个过程：

1) 化学反应过程：混凝土碳化的化学反应式见式 (1-2) 和式 (1-3)，混凝土的化学反应过程进行得较快，反应的速度主要取决于 CO_2 的浓度和混凝土可碳化物质的含量，

其中混凝土中可碳化物质的含量又受到水泥品种、水泥用量及水化程度等因素的影响。

2) 二氧化碳等在混凝土中的扩散速度：二氧化碳 (CO_2) 或其他酸性物质可通过混凝土孔隙向混凝土内部扩散。这个过程的速度取决于扩散物质的浓度和混凝土的孔隙结构。混凝土的孔隙结构主要受混凝土水灰比和水泥水化程度的影响。

3) 氢氧化钙的扩散：氢氧化钙可在孔隙表面的湿度薄膜内扩散，其速度取决于混凝土的含水率和氢氧化钙浓度的梯度。

在上述三个过程中，二氧化碳在混凝土中的扩散速度最慢，它决定了混凝土碳化过程的速度以及它的分层特性。

上述三个过程均与混凝土的含水量及其周围介质的相对湿度有关。这是因为 CO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应所释放的水必定要向外扩散，以保持混凝土内部与大气之间的湿度平衡。如果这一扩散速度过慢，混凝土内部的水蒸气压力升高而达到饱和，于是 CO_2 向混凝土内部的扩散实际上即行终止。当介质相对湿度接近 100% 时，混凝土中的微孔隙被水蒸气的冷凝水所充满，反应附加水的向外扩散和 CO_2 向内扩散的速度就大幅度降低，碳化过程实际上就不能进行，在空气的相对湿度为 50% ~ 60% 时，混凝土的碳化速度最快。这是因为此时混凝土的孔隙尚未被水充满， CO_2 可以向混凝土内扩散，而混凝土孔隙中的湿度薄膜不仅为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 向外扩散提供了必备的条件，而且使得化学反应进行得较快。

在空气相对湿度为 25% 时，虽然 CO_2 向混凝土内扩散的速度较快，但是由于混凝土中的水分不足， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的扩散就无法进行，化学反应的速度极慢，混凝土的碳化实际上停止，因此在空气相对湿度不是很小时 ($\leq 25\%$)，混凝土处于干燥状态，其碳化就不是以 CO_2 的扩散来制约，而是以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的扩散及化学反应来制约的。

混凝土的碳化深度 d (mm) 与碳化速度系数 K 及碳化时间 t (年) 的平方根的乘积成正比，即 $d = K\sqrt{t}$ 。

混凝土的碳化速度系数与采用的水泥品种、水泥用量、水灰比、振捣情况、养护方法、外加剂、掺合料等多种因素有关。

一般来说，水泥用量越大，水泥标号越高，碳化速度系数越小。而矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥混凝土的碳化速度系数要比硅酸盐水泥混凝土的大。

(2) 混凝土结构中钢筋的锈蚀机理：直接暴露于水和氧气环境中不受保护的钢筋会发生锈蚀。锈蚀过程是电化学腐蚀过程，是由铁与电介质溶液接触形成大量的微腐蚀电池所引起的。当电介质溶液的 pH 值小于 4 时，腐蚀表现为酸蚀，即为氢的去极化反应，腐蚀速度很快；当 pH 值为 4 ~ 10 时，腐蚀表现为锈蚀，锈蚀速度受氧的去极化反应控制，腐蚀速度明显降低；当 pH 值大于 10 时，钢筋表面开始生成一层溶解度很小的氧化保护膜（钝化膜），锈蚀速度迅速降低；当 pH 值接近 12 时，这层保护膜变得十分致密稳定，使阳极反应难以进行，锈蚀趋于停止，钢筋处于钝化状态。硅酸盐类水泥在凝结硬化时，大量生成的氢氧化钙和水泥中含有的硝、钾、氧化物能使混凝土孔隙溶液呈高碱性，其 pH 值可达 12.5 ~ 13.5，因此处于混凝土中的钢筋会发生钝化，受到混凝土的保护而免遭锈蚀。只有当钢筋表面的钝化膜破坏时，钢筋才会生锈。

在自然环境条件下，混凝土中钢筋钝化膜的破坏或者是由于混凝土保护层中性化（主要是碳化）使钢筋周围溶液的 pH 值降至 11.5 以下或是由于氯离子渗透聚集在钢筋周围

并达到临界值（每立方米混凝土含 0.6~1.2kg 游离 Cl^- 或 OH^- 的摩尔浓度比大于 0.6）所致。钝化膜破坏后钢筋便开始锈蚀，或是均匀锈蚀或是局部坑蚀混凝土结构中的钢筋同时满足以下条件时就会产生锈蚀：

- 1) 钢筋表面存在电位差，不同电位的区段之间形成阳极和阴极
- 2) 阳极区段的钢筋表面处于活化状态，在阳极发生反应：



- 3) 存在水分和溶解氧，在阴极发生反应：



钢筋中的碳及其他合金元素的偏析，混凝土的碱度差异，氯离子浓度差异，混凝土裂缝处的钢筋表面的氧气剧增形成氧浓度差异，或加工引起的钢材内部应力，这些都会使钢筋各部位的电极电位不同而形成局部电池（即钢筋表面存在电位差）。但是，混凝土的高碱度又使钢筋表面形成钝化膜而防止了钢筋的锈蚀。一旦钢筋的钝化膜被破坏，在有水和氧气的条件下，就会发生腐蚀电池反应，在阳极发生式（1-4）的反应，铁被溶解进入溶液，在阴极上发生式（1-5）的反应，于是溶液中的 Fe^{2+} 和 OH^- 结合而形成氢氧化亚铁：



氢氧化亚铁与水中的氧作用生成氢氧化铁：



钢筋表面上生成氢氧化铁，它下面的铁就成为阴极，进一步促使锈蚀。

随着时间的推移，一部分氢氧化铁进一步氧化，生成疏松的、易剥落的沉积物——铁锈（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）。铁转化成铁锈时，伴有体积膨胀，膨胀量根据氧化状态的不同而异，约为原体积的 2~4 倍。钢筋锈蚀时的体积膨胀是钢筋混凝土结构产生顺筋裂缝和混凝土保护层脱落、钢筋外露的原因。

随着钢筋锈蚀的发生，混凝土开裂、剥落，钢筋和混凝土的粘结力就不断丧失，钢筋截面积就减少，承载能力下降，从而降低了结构的安全度，结构损坏事故就可能发生

混凝土中钢筋锈蚀的发生和速度受阳极和阴极过程的制约。钝化膜破坏，钢筋表面处于活化状态，不同区之间出现电位差是阳极过程（低电位区）和阴极过程（高电位区）发生的必要条件。由于阴极反应还需要有氧气和水分参加，因此钢筋表面阴极区存在空气和水是绝对必要的。否则阴极反应将受到抑制难以实现，使得阳极反应也被迫停滞亦即钝化膜破坏后，氧和水通过混凝土保护层向钢筋表面扩散的速度决定着钢筋的锈蚀速度。另外混凝土电阻率的大小（主要与电解质、含水量有关）也会影响钢筋锈蚀的速度；只要混凝土电阻率超过 $50 \sim 70 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 就不会观察到明显的锈蚀。

钢筋混凝土结构的钢筋锈蚀破坏过程在宏观上可以被区分为潜伏期、发展期、加速期和破坏期四个阶段。潜伏期由混凝土硬化开始，持续到钢筋钝化膜被破坏为止。在潜伏期内，碳化由混凝土表面逐渐向内部发展，最终碳化深度超过混凝土保护层，到达钢筋表面；或者是 Cl^- 由混凝土表面向内部渗透，在钢筋周围聚集并达到临界值。潜伏期的长短取决于混凝土的质量和保护层厚度、所处环境中酸性介质或 Cl^- 的浓度、环境温度以及干湿循环频数等。如果混凝土在浇筑时的 Cl^- 含量已达到临界值，则潜伏期不复存在。从钝化膜被破坏后，钢筋开始锈蚀，直到锈蚀产物膨胀使混凝土保护层产生顺筋裂缝为止，称

为发展期氧气透过混凝土保护层的扩散系数、混凝土的湿度和电阻率决定着钢筋锈蚀速度和发展期长短。混凝土保护层开裂后，钢筋锈蚀进入加速期在加速期内，顺筋裂缝将加速钢筋锈蚀，继而钢筋保护层出现大片剥离和崩落现象。此时钢筋锈蚀继续加速发展，进入破坏期。钢筋的截面积减小、抗拉强度和极限延伸率明显降低，出现屈服点不明显状况，从而降低结构的承载能力和稳定性，危及结构物的安全。钢筋混凝土结构的设计使用寿命应小于或等于潜伏期、发展期和加速期之和。对于由氯离子局部侵蚀引发的钢筋局部坑蚀或盐污染和阴极抑制引发的宏观电池腐蚀可能不会生成常见的膨胀红铁锈，其发展破坏过程亦不明显。

[实例 1-6] 某钢筋混凝土 T 形梁桥建于 1988 年，设计荷载汽—20、验算荷载挂—100。裂缝状况见工程实例 1-2。根据检测，发现梁内钢筋基本处于严重锈蚀的活动状态；碳化试验表明，主梁表面均存在不同程度的混凝土碳化现象，最大碳化深度 0.32cm，平均碳化深度 0.298cm，并进行了氯离子含量的测定，氯离子含量（占水泥重量）最高为 2.8%~4.0% 之间，位于混凝土深度 3cm 处。在混凝土表层和深度大于 3cm 时，其含量明显减少，表明随着碳化作用的影响，混凝土内的氯离子向内部游离渗入，在钢筋位置形成明显的积聚，使钢筋位置处的氯离子含量超过诱发钢筋锈蚀氯离子含量 0.4% 临界值的 7~10 倍，加上潮湿空气的影响和梁的开裂，诱发了钢筋的锈蚀。

3. 剥蚀的破坏机理

根据不同的机理，剥蚀可分为冻融剥蚀、冲磨和空蚀、水质侵蚀、风化剥蚀等。

(1) 冻融破坏机理：混凝土的冻融破坏系指在水饱和或潮湿状态下，由于温度正负变化，结构物的已硬化混凝土孔隙水结冻膨胀，融解松弛，产生疲劳应力，造成混凝土由表及里逐渐剥蚀的破坏现象。冻融剥蚀破坏会使钢筋混凝土梁桥的墩台、梁板、桩等钢筋混凝土结构的有效承载面积减小，并诱发钢筋锈蚀，加速老化进程，导致结构物的承载能力和稳定性下降冻融破坏好像是“皮肤病”，往往不能引起工程技术人员的重视。

混凝土是由水泥砂浆和粗骨料组成的含毛细孔复合材料。为了获得浇筑混凝土所必须的和易性，混凝土中加入的拌和水总要多于水泥所需的水化水。这部分多余水便以游离水的形式滞留于混凝土中，形成占有一定体积的连通毛细孔。这些连通的毛细孔就是导致混凝土遭受冻害的主要原因。按照公认程度较高的，由美国学者 T. G. ~~W~~orse 提出的膨胀压和渗透压理论，吸水饱和的混凝土在冻融过程中遭受的破坏应力主要由两部分组成。一是当混凝土毛细孔水在某负温下发生物态变化，由水转变成冰时，体积膨胀 9%，因受毛细孔壁约束形成膨胀压力，从而在孔周围的微观结构中产生拉应力。二是当毛细孔水冻结成冰时，由凝胶孔中过冷水在混凝土微观结构中的迁移和重分布引起的渗透压。由于表面张力的作用，混凝土毛细孔隙中水的冰点随着孔径的减小而降低。凝胶孔水形成冰核的温度在 -78°C 以下，因而由冰与过冷水的饱和蒸气压差和过冷水之间的盐分浓度差引起水分迁移而形成渗透压。另外凝胶孔水向毛细孔渗透的结果必然会使毛细孔中冰的体积不断增大。形成更大的膨胀压力。当混凝土受冻时，这两种压力会损伤混凝土的内部微观结构。但一次作用造成的损伤远不足以使混凝土的宏观力学性能发生可以察觉的变化，只有当经过反复多次的冻融循环以后，损伤（微裂缝）逐步积累，不断扩大，才会发展成互相连通的大裂缝，使混凝土的强度逐渐降低，最后甚至完全丧失。

如果混凝土的含水量小于饱和含水量的 91.7%，那么当混凝土受冻时，毛细孔水的结冰膨胀可被非含水孔体吸收，不会形成损伤混凝土微观结构的膨胀压。因此，饱水状态是混凝土发生冻融剥蚀破坏的必要条件之一。另一必要条件是外界气温的正负变化能使混凝土孔隙中的水发生反复冻融循环。这两个必要条件决定了冻融破坏是从混凝土表面开始的层层剥蚀破坏。

冻融对混凝土结构破坏作用的大小取决于混凝土的抗冻性、饱水程度、混凝土所处环境的最低气温、冻融速率、最大冻深和年冻融循环次数等因素。影响混凝土抗冻性的主要因素有：混凝土的水灰比、含气量、水泥品种、骨料质量、外加剂和接合料等。

破坏形态特征：

表面剥落：一般表现为混凝土表面起毛——砂浆剥落——骨料裸露——脱落，如此由表及里逐层剥落；但当混凝土构件较薄、冻深大于构件厚度，且吸水饱和时，就会发生整个构件酥软崩解现象。

冰冻裂缝：当混凝土中的骨料为吸水率较大的岩石时，易发生这种形式的冻害。吸水饱和的骨料受冻时受膨胀压力和渗透压力作用膨胀爆裂使混凝土产生裂缝。在构件的端部、混凝土桥面板的接头、墩台平行于水面线处产生的线状裂缝，对混凝土桥面板有时出现喷火口状开孔的“崩胀”现象，也就是通常所说的 D 形裂缝，如果冻胀骨料位于混凝土表面区，则会发生局部胀突现象。

冻胀和冻拔：在严寒地区，由于地基土常处于饱水状态，冻胀性强，冻胀量大，对翼墙、锥坡、墩台基础、调治构造物等部位易产生冻胀作用，引起结构的上抬下陷，使结构产生位移，混凝土产生裂缝等，有时会导致桥面隆起，形成所谓的“罗锅桥”，影响了正常运行，严重时会导致桥面落架，引发工程事故。

[实例 1-7] 某钢筋混凝土桥梁及桥墩遭受冻融破坏。该桥梁约有 20 年运行历史。冻害首先表现为 T 形梁端部产生了微细的网状开裂，初期裂缝扩展延伸至挑檐下部，以后混凝土逐渐剥落。桥墩首先由顶部转角处破坏进而扩大到整座桥墩。

根据破坏情况初步分析，认为可能是由于反复冻融所致。为确认造成破坏的原因，又进行了详细的调查和检测。

桥梁所处地域冬季（12 月～次年 3 月）平均气温约为 -3°C 。日间最高气温为零上，夜间最低气温为零下，差值平均为 $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。平均积雪量大约为 2m。据施工时实测，冬季湿度白天约为 50%，夜间约 85%。因融雪使 T 形梁和桥墩局部混凝土具备冻融条件。

根据当时施工记录，素混凝土最大骨料粒径为 50mm，水灰比为 0.56，坍落度 3.0～5.0cm，含气量 3%～4%， $R_{28} > 16\text{MPa}$ ；钢筋混凝土最大骨料粒径 25mm，水灰比为 0.48，坍落度 7.5～10.0cm，含气量为 4～5%， $R_{28} > 20\text{MPa}$ 。骨料为施工现场附近所产，除定期进行试验外，只要料场有变化就进行试验并按粒度修正混凝土的标准配合比。骨料岩质为花岗岩和安山岩。受破坏的混凝土中含有很多细煤屑，这是因为在采石场上游有个煤矿，致使煤渣混入骨料。

用回弹仪现场检测完好混凝土的抗压强度，结果如下：钢筋混凝土梁 35～50MPa，无筋桥台 22～35MPa，钢筋混凝土桥墩 28～36MPa。现场钻取芯样测得 T 形梁混凝土抗压强度为 29.0MPa，桥台混凝土为 14.4～24.7MPa。

由于破坏混凝土骨料中混有煤屑，故重做了与外地优质骨料的对比试验。结果表明：以现场产骨料配制的混凝土比使用优质骨料的强度稍有偏低

根据气象条件分析，由于降雪，混凝土经常处于有水分补充状态，故可以断定其承受昼夜重复冻融作用。因冬季停止浇筑混凝土，而且是数年后才发现开裂，因此可以认为，浇筑混凝土之后没有受到早期冻害。混凝土的水灰比和含气量均属正常范围。三个厂家供应的水泥中虽有一家的水泥强度稍有偏低，但也并不能成为混凝土劣化的主要因素。而在粗细骨料中混进相当多的煤屑，降低混凝土强度约 15%~20%，据推断，也进一步减弱了混凝土的抗冻性。综上所述，在苛刻的冻融条件下，使用强度偏低的含煤屑混凝土是该桥梁结构破坏的主要原因。

(2) 冲磨和空蚀机理：冲磨和空蚀均发生在钢筋混凝土梁桥墩台部位的混凝土表面，而且冲磨破坏往往诱发空蚀，但冲磨破坏与空蚀破坏的机理完全不同。冲磨破坏又可细分为推移质冲击磨损破坏和悬移质冲磨破坏。

1) 冲磨破坏机理：携带泥、沙、石的高速水流对混凝土表面的冲磨破坏是一种单纯的机械作用破坏。悬移质泥沙颗粒较小，在高速水流的紊动作用下能充分与水混合，非常均匀地与水流一起运动，形成近乎水质点的两相流。高速水流携带的悬移质在移动过程中触及建筑物过流面时的作用表现为磨损、切削和冲撞。悬移质对混凝土的冲磨破坏在开始的一段时间内表现为从表面开始的均匀磨损剥离。随着磨损剥离程度的增加，由于混凝土（砂浆）的非均质性，过流表面会出现凹凸不平的磨损坑。这时水流就会受到扰动，在过流表面形成各种类型的漩涡流，这些漩涡流的强度随着流速的增大而加剧。水流条件的恶化会加速冲磨破坏的进程，而磨蚀坑加深又会进一步恶化水流条件，形成恶性循环。这时破坏作用已不是单纯的冲磨破坏，随着各种漩涡的出现便产生了空蚀破坏。含悬移质高速水流对钢筋混凝土桥梁墩台表面冲磨破坏作用的大小与水流速度、水流形态、悬移质含量、悬移质颗粒粒径、形状和硬度以及混凝土的抗冲磨强度等因素有关。

推移质对钢筋混凝土桥梁墩台的破坏作用机理与悬移质不完全相同。在高速水流的作用下，推移质以滑动、滚动及跳动等方式在过流面上运动，除了滑动摩擦作用外，还有冲击砸撞作用。推移质带有很大动能，冲撞砸击在脆质的混凝土上，在撞击接触区会形成很高的局部应力，当这种应力超过混凝土的内聚力时，就发生局部破坏。加上滑动磨损和水流的淘刷，携带推移质的高速水流对墩台表面的破坏力很强。推移质在输移过程中有着自己的输移带，输移带的位置和方向随着水流主流的变化而变化，具有强烈的脉动性。在输移带内推移质的冲磨作用也不均匀，一般还存在有一定宽度的强烈输移带。推移质冲磨破坏形成的冲坑和冲沟均出现在强烈输移带内。推移质冲磨破坏作用的大小决定于水流速度、流态、推移质的数量、粒径及其运动方式。对桥梁来说，破坏程度还和材料的抗冲耐磨性能、过流时间等因素有关。

2) 空蚀破坏机理：高速水流（当水头大于 30m 或流速大于 25m/s，某些情况下 15m/s 时）的空蚀过程比较复杂。一般来说，当高速水流流过钢筋混凝土梁桥墩台体型变化处或表面不平整处时，就会发生涡流和与过水边壁分离现象，造成局部压强降低。当流场中局部压强下降到水的蒸气压时，水流的连续性会遭受破坏，在水流中形成大量的充满水蒸气和空气的空泡（一般称为空穴），这些空穴被水流挟带到高水压区时，受到周围水体的压