建立了一个结构可靠性分析模型，包括横向开裂、氯化物扩散和腐蚀起始之间的相互作用；设计规范对腐蚀起始和传播的影响；以及可用性极限状态（如，剥落）。该可靠性模型用于评估一个典型的钢筋混凝土桥连续板的弯曲和剥离极限状态的结构和可用性失效的概率。使用除冰盐将会产生氯化物污染。除冰盐的应用导致结构和维修性显著降低；这一观察结果与桥梁性能的现场数据一致。此外，可靠性分析允许对腐蚀的影响进行定量测量。混凝土覆盖层和特定的混凝土抗压强度对剥落概率的影响特别显著。可靠性分析用于演示如何使用已用极限状态（剥离）来更新概率

钢筋混凝土(RC)结构中钢筋的腐蚀是导致桥面结构恶化的主要原因。 腐蚀引发的纵向开裂和混凝土保护层的相关剥落也是常见的问题。 腐蚀主要是由氯化物污染引起的，通常与覆盖不足或混凝土质量差有关。 与钢筋锈蚀有关的劣化过程有以下两个阶段：

钢筋腐蚀开始的起始时间。腐蚀主要由氯化物污染引起，通常包括混凝土覆盖层减少、不适合其暴露环境的低质量混凝土以及压实和养护较差。氯化物可能通过保护混凝土覆盖层扩散，一旦氯化物浓度超过临界阈值，就会开始腐蚀。如果干燥收缩、弯曲、热或其他裂纹宽度足以允许氯化物、氧和水分直接进入，则也可以引发腐蚀。碳酸盐（暴露在大气中的二氧化碳中）将释放与混凝土基质结合的氯化物，从而使钢筋更容易受到氯化物引起的腐蚀。

传播钢筋腐蚀，导致面积损失（金属损失）。腐蚀产物（锈蚀）体积的增加会导致混凝土拉伸应力足够大，可能导致内部微开裂、外部纵向开裂并最终剥落。这可能会导致腐蚀速率的加速和/或粘结剂的减少，进而可能导致可用性失效和/或结构完整性的丧失。

然而，很大一部分桥梁都是旧的，需要修复的；例如，在美国，超过50%的桥梁的历史超过了50年。结构老化率随着桥梁老化而增加；这是由法律荷载标准的增加、桥梁材料的恶化、其他交通工具的磨损和损坏、维护不善或不足以及其他因素造成的。这也是由于除冰盐的增加，混凝土氯化物浓度的增加——20世纪50年代初到~1500万吨/年[例如，巴比亚（1995）]。因此，在美国，每年大约有150-200座桥梁部分或完全倒塌，美国有125,000座桥梁被评为结构缺陷（仅限于轻型车辆的桥梁被关闭或需要立即修复以保持开放），这也就不足为奇了。据估计，需要900亿$来纠正这些问题。除此之外，目前还花费了1400亿美元的$来将该基础设施维持在现有水平(邓克和拉巴特1993年；阿克坦等人。1996)。在许多其他国家也存在着类似的问题。显然，强有力的财政动机是保护现有的桥梁基础设施，新桥梁在使用寿命内需要最少的维护或维修。

桥梁管理系统用于桥梁设计、施工和维护资源的最佳配置。如果影响桥接性能的所有参数都是已知的（或确定性的），那么与最佳资源的分配相关的决策过程应该相对简单。然而，在实际实践中，预测服务或寿命载荷时存在不确定性；使用非精确结构行为（预测）模型时；考虑材料性能、工艺、元件尺寸、环境条件、检查数据和维护的变异性；预测疲劳、腐蚀或其他变质过程等。因此，与桥梁设计和评估相关的决策是基于不确定或不完整的信息。在这种情况下，一个有用的决策工具是可靠性（或概率性）分析，因为这可以为比较在不确定性情况下作出的决定的可能结果提供一个合理的标准。桥梁的可靠性可以用来实现

通过与基于可靠性的验收标准（如目标可靠性指标）进行比较来评估性能

例如，一座桥梁的最新可靠性（经过检查）可以与某种最低可接受的可靠性进行比较；通过这种比较，可以确定桥梁的相对安全、指定的负荷等级或估计的“剩余寿命”[例如Stewart（1998）]。 本文为一种与时间相关的生命周期（可靠性）分析建立了一个初步的概率框架。

关于评估钢筋混凝土桥梁退化的概率方法的研究正在以越来越快的速度进行[例如，Das（1996年）和Frangopol和Hearn（1996年）]，尽管它仍然相对有限。 霍夫曼和韦尔斯（1996）建立了桥面氯化物扩散的概率模型，这是由于除冰盐的应用。 然而，这个模型假设当腐蚀开始时发生失效-这是一个非常保守的假设。 Thoft-Christensen等人。 （1996年)开发了似乎是第一个基于可靠性的专家系统，该系统计算结构可靠性，同时考虑到基于起始(氯化物、碳化）和钢筋腐蚀传播的倒塌和弯曲开裂极限状态以及检查和修理的决策模型。 这具有很大的潜力；然而，所使用的时变可靠性分析是非保守的，忽略了收缩和纵向（剥落）开裂、可使用极限状态和粘结损失的影响。瓦等人。（1998）利用非线性有限元模型、偏转极限状态、立即腐蚀启动、均匀碳化和局部氯化物腐蚀传播模型考虑减少钢面积和粘结损失。弗朗戈波尔等人。（1997）开发了概率腐蚀建模的一个有用的实际应用；也就是说，一种基于预期寿命成本最小化的基于可靠性的设计方法。斯图尔特和罗索斯基（1998b）开发了一个结构退化可靠性模型来计算钢筋混凝土连续桥面桥的结构失效（弯曲）的概率。在该研究中，腐蚀源于应用除冰盐、海洋环境中的大气暴露（海喷）、碳化和弯曲开裂。

现有的桥梁可靠性研究往往忽略了**横向开裂、氯化物扩散和腐蚀启动之间的相互作用**；设计规范对腐蚀启动和传播的影响；以及可用性极限状态（如，剥落）。在本研究中，特别强调了对这些现象的建模。将斯图尔特和罗索斯基（1998b）开发的结构退化可靠性模型扩展到包括这些现象。本文描述了一个改进的概率框架来计算一个典型的RC桥连续板的结构和维修性失效（弯曲和剥离极限状态）的概率。使用除冰盐将会产生氯化物污染。该模型解释了氯化物扩散的变异性、临界阈值氯化物浓度、腐蚀率、混凝土材料特性、元素尺寸、钢筋放置、环境条件和荷载。假设腐蚀会导致钢筋的横截面积减少，从而可能导致混凝土盖板的纵向开裂或剥落。横向开裂（收缩、弯曲）也被认为是引发开裂的原因。设计变量，如水灰比、混凝土抗压强度和覆盖层等的影响，都包含在材料性能模型中。不考虑键的损失，因为它似乎对挠曲中桥梁元件的可靠性没有显著影响(Val等人。 1998)。 蒙特卡罗模拟用于计算桥梁寿命（100年)内结构失效和剥落的随时间变化的概率）。 可靠性分析还用于（1)演示如何使用已知的可使用极限状态(剥落)的超出可以用来更新结构故障的概率；(2）估计该桥在以后几年将故障的概率，因为它已经度过了T年的服务负荷[即，服务来源（旧）结构的可靠性增加]。对混凝土保护层和混凝土抗压强度对可靠性的影响进行了评价。 可靠性分析用于演示如何使用已知的可使用极限状态(SpaIling)的超越来更新结构故障的概率。 本文所开发的时间相关可靠性分析可以在稍后阶段应用于其他RC桥结构配置，或者在现有的检查、维护或负载额定值程序（即桥梁管理系统)中用作可靠性模块）。

利用菲克定律，优选用水溶性氯化物给出浓度，因为一般认为腐蚀受到混凝土孔隙溶液中存在的游离（水溶性）氯化物浓度[例如，图乌蒂（1982）]的影响。然而，文献中给出的几乎所有氯浓度数据均指酸溶性氯浓度；因此，本文描述的氯浓度也指酸溶性（或总）氯化物。

在一项包含来自美国321个混凝土桥面的样本的研究中，霍夫曼和韦耶斯·（1994）得出结论，表面氯化物浓度不会随着时间而积累。相反，他们发现表面氯化物浓度与饱和除冰盐溶液中的氯化物浓度保持平衡，因此是恒定的。在此情况下，距离混凝土表面距离x的氯化物含量[C（x、t）]由

在美国，每个州的平均扩散系数估计范围从0.6E-8cm%到7.5E-8cm2/s，总体平均范围约为2.0E-8cm2/s（霍夫曼和韦耶斯1994年）。本研究进一步发现，为每个状态获得的扩散系数的变异系数从0.3到1.6不等，平均0.75代表了美国“典型”状态内的变异性。这一估计与铃木等人广泛一致。（1990）发现，日本沿海地区结构的扩散系数的变化系数为0.56。请注意，这些统计分析是针对一系列不同的结构进行的，因此代表了与不同的设计参数（例如，混合设计、固化状态）、暴露等相关的变异性。在本研究中，假设其变化系数为0.75。为了避免负值，将扩散系数被建模为对数正态随机变量。

根据相同的现场数据，美国各州的平均表面氯化物含量分别为1.2至8.2kglm3。表面氯化物含量的平均值和变化系数分别为钴=3.5kglm3和0.5，并建模为对数正态分布（霍夫曼和韦耶斯1994）。

混凝土渗透性受配合比（水灰比、水泥类型）、养护、压实和环境的影响。 然而，人们普遍认为，水灰比（配合比)对混凝土渗透性有显著影响，因为水灰比的增加增加了毛细孔隙度[例如，耐久(1992）]。 水灰比对扩散系数D的影响是由Bentz等人开发的计算机集成知识系统得到的。 （1996）。 该系统从16个不同的实验数据来源开发了氯化物扩散的预测模型。 因此，对于给定的混合比例，知识系统可以预测扩散系数(图。 1)。 给出了预测扩散系数最佳拟合的最小二乘线

氯化物浓度必须达到临界阈值，氯化物浓度Cr引起钢筋周围保护被动膜的溶解，从而引发钢筋的腐蚀。 许多研究表明，临界阈值氯化物浓度往往在0.6-1.2kglm3的范围内[例如，Cady和Weyers（1983年）和Mehta（1991年)）。 临界阈值氯化物浓度受水灰比、水泥类型、温度、水和氧含量、pH、粉煤灰含量和硅灰含量等因素的影响。 因此，即使对于类似的结构，临界阈值氯化物浓度也会有所不同。 在本研究中，临界阈值氯化物浓度被建模为在0.6-1.2kglm3范围内的均匀分布随机变量。

横向裂纹-弯曲和收缩

混凝土中由于施工（加工，放置，养护，早期加载等）而存在**裂缝。 收缩和热效应**。 裂纹的萌生和扩展也受结构体系类型的影响；例如，钢筋混凝土板桥和钢筋混凝土板桥的开裂现象将有所不同。 硬化混凝土开裂的一个常见原因是干缩（“指南”，1996年）。 此外，载荷诱导的拉伸应力场导致内部裂纹向外扩展，现有的外部裂纹向内扩展。 大的表面裂缝是不可取的，因为很可能更宽的裂缝允许更大的水分、氧气和二氧化碳通过混凝土覆盖和向钢筋迁移。 这些是腐蚀的必要成分。 很可能前面描述的扩散过程包括（虽然不是明确的）微裂纹的影响。

此处使用的横向开裂一词是指交叉裂缝，由干燥收缩或弯曲引起，穿过主筋。 一般来说，可以说裂纹宽度可能影响腐蚀的起始，但腐蚀仅限于裂纹区，不影响随后的扩展过程[Beeby1983；混凝土学会(CS)1995；SchieBI和Raupach1997]。 纵向（或粘结）开裂会影响腐蚀的传播，因此会导致剥落和强度损失(Beeby1983；CS1995)-纵向开裂和剥落将在本文后面考虑。

提出了许多弯曲裂纹宽度模型，其中许多模型已被用作控制宏观裂纹的代码规定的基础。 不幸的是，许多现有的裂缝控制方程[ACI318（“建筑”，1995年）和BS8110（“结构”，1985年)]意味着随着混凝土保护层的增加，裂缝宽度显著增加(例如，裂缝宽度增加80-90%，使覆盖加倍）。 然而，实验结果表明，裂缝宽度对混凝土保护层的敏感性明显降低(Makhlouf和Malhas，1996年)。 因此，本文采用CEB-FIP模型代码（模型1990）来预测最大裂纹宽度Wmax‘，因为裂纹宽度对覆盖相对不敏感，并且使用比大多数其他裂纹宽度模型更多的实验数据对该裂纹宽度模型进行了校准