

STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(第 39 期, 2013 年 8 月)
日本钢铁联盟与日本钢结构协会会刊

中文版

STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW 是每年出版 3 期的英文版刊物, 面向全球各相关企业与部门发行。本刊物的目的是介绍建筑、土木工程领域的钢结构相关规格、规范以及先进的项目实例、最新施工技术及材料等。

为了更便于中国的读者理解这些内容, 我们以文章部分为中心编辑了中文版, 与英文版一并提供。有关文中的图表与照片, 我们仅翻译、刊载了标题。有关具体内容, 请参照英文版。另外, 也请参照英文版确认技术性说明和具体内容。

第 39 期 (2013 年 8 月) : 目录

关于港湾设施的维护管理	1
港湾钢结构体的寿命周期管理	4
在海洋环境下因钢材腐蚀对涂层劣化造成的缺陷及曝露条件的影响	7
存在腐蚀损伤的钢结构体的剩余承载力评估与性能预测	10
同时也考虑维修后性能的港湾钢结构体寿命周期性能评估技术	13
发生了腐蚀劣化的港湾钢结构体的剩余承载力的评估方法	16

中文版: ©一般社团法人日本钢铁联盟 2013

邮政编码 103-0025

东京都中央区日本桥茅场町 3-2-10

一般社团法人 日本钢铁联盟

传真: 81-3-3667-0245

电话: 81-3-3669-4815

电邮地址: sunpou@jisf.or.jp

URL <http://www.jisf.or.jp>

(1~3 页)

关于港湾设施的维护管理

国土交通省港湾局技术企划课

港湾维护企划室

远藤 直树

前言

许多日本的港湾设施是在上世纪 70 年代~80 年代修建的, 预计今后将同时迎来老朽化, 因此与其它社会资本同样, 要求对这种状况采取对策。

此外, 鉴于国家及地方政府严峻的财政状况、人口减少、以及少子高龄化等社会状况, 不得不承认仅靠以往对老朽化采取的措施难以应对这种局面。当前, 作为国土交通省总体, 成立了社会资本维护战略分委员会以及各种会议等, 致力于讨论老朽化对策的必要措施等, 本文将对港湾设施的预防性维护计划进行说明。

从事后维护向预防性维护转变

目前, 作为在港湾设施中发挥基础作用的公共码头, 截至 2013 年 3 月, 建成后已经过 50 年以上的设施约占 8%, 但在 20 年后的 2033 年 3 月, 预测将增加到约占 58% (图-1)。由于老朽化的进展, 陷于如图-2 所示状态的设施增加, 不仅性能降低, 而且还担心发生事故等。

由于发生这些老朽化, 社会资本的寿命周期成本 (直到未来用于设施维护管理及改造等的费用) 增加, 以老朽化为起因而发生的事故等造成向国民提供公共服务的品质降低等, 将成为重要的课题。为了应对这些课题, 我们认为需要从直到出现全面更新施工必要性之前不考虑对策的事后维护型理念、向考虑延长设施的寿命和降低寿命周期成本的预防性维护的理念转换, 建立这种机制 (图-3)。此外, 应贯彻港湾管理部门的维护管理, 对于因老朽化导致事故及功能不全等防患于未然, 也必须建立这种机制。

图-1 公共码头的各年度建成数量的变化

图-2 码头的老朽化事例

图-3 预防性维护和事后维护的示意

作为老朽化对策的一环, 为了推进港湾设施的计划性和妥善的维护管理, 当前, 港湾局以制定维护管理计划和根据该计划开展妥善的维护管理为目标, 推进法令的完善以及在技术方面、预算方面等的各项措施。关于维护管理计划, 虽然计划的内容适合于各设施的维护管理, 但没有考虑在其性质方面对实现港口总体的事业费削减和各年度事业费的平均化进行讨论。因此, 我们制定了“预防性维护计划”, 可从俯瞰的视点出发, 对各港口进行讨论。

预防性维护计划

预防性维护计划以港口内的港湾设施为对象, 制定了各设施老朽化的对策方针以及以其为基础的 5 年程度的事业概要, 基本上按港口为单位制定。制定主体是国家 (直辖港湾事务所等) 和港湾管理部门, 原则上两者进行充分的调整后制定。其中, 在“对策方针”栏, 记载了是否事实老朽化对策等方针的内容 (表-1)。

表-1 预防性维护计划 (示意)

关于对策方针, 在考虑设施的社会性状况 (使用状况、有无替代性、有无紧急情况时使用的设定、港湾利用单位的要求等) 和物理性状况 (老朽化程度、结构特性等) 的同时, 做出综合性判断决定。

此外在对策方针方面, 除了对积极实施老朽化对策的设施进行讨论之外, 也需要对转换使用和报废的设施进行讨论。例如, 对由于成为计划填埋地而在未来报废的设施、考虑不作为停靠设施发挥作用的设施等变更用途而不实施预防性维护事业等, 意识到降低港湾设施总体的寿命周期成本而制定合理的计划非常重要, 要求在保证必要功能的同时管理港湾设施的存量, 成为计划性、战略性的内容。

结语

本次介绍的预防性维护计划从 2013 年度开始推进, 今后, 根据社会状况的变化和在预防性维护中出现的各种问题, 我们也将进行调整, 使计划更趋于完善。2013 年是所谓维护政策的开创之年。作为我们港湾局将通过基于正在持续审议的讨论会和

新的制度等各种机制，为了维持未来的优质公共服务，关于港湾设施的老朽化对策，将与以港湾管理机构为首的相关表部门协作推进。

(照片)

静冈县 清水港日之出地区日之出 4 号码头…栈桥式，水深 12m，2011 年建成



(4~6 页)

港湾钢结构体的寿命周期管理

北海道大学研究生院工学研究室

教授 横田 博

序言

港口和码头结构具有很长的寿命，并且必须在其寿命周期内满足无法预见的要求。由于物理因素和化学物质的作用，在恶劣的海洋环境下，钢结构体和混凝土基本上其结构材料趋于劣化，可能发生结构性能丧失、甚至造成结构倒塌的后果。在最初设计阶段，设计人员作出一些假设，在可能发生的最坏情况下留出一定的安全余量，因此该结构可保持其超过分别要求水准的结构性能。然而，结构构件的严重劣化可能因缺乏足够的耐久性设计与乐观的假设和 / 或缺乏妥善的维护所造成。

为了满足这些要求，力求实现设计与维护之间的协调至关重要。寿命周期管理是一个有组织的系统，支持基于工程的决策，在结构设计、维护、以及结构的寿命期间中所有相关的工作中，确保实现足够的结构性能和长寿命结构。

寿命周期管理

结构的使用寿命由进行规划的所有活动构成，即基本设计和详细设计、包括材料选择、制造、和施工的建设工作、包括评估和干预的维护工作、以及报废，如图-1 所示。寿命周期管理是一个综合性概念，以协助进行结构总体寿命周期的管理活动，实现可持续性。可持续性对于港口和码头结构是一个非常重要的关键词，不仅对于这些结构，而且包

含全部民用基础设施。

在寿命周期管理中如图-2 所示，最重要的工作是制定和更新寿命周期管理方案 (LCM 方案)。制定该方案时应考虑以下项目：

- 环境特性；
- 设计假设；
- 验证结果；
- 规格；
- 初始成本估算；
- 寿命周期管理的维护方案和方法；
- 性能要求；
- 使用寿命估算；
- 寿命周期成本；
- 环境成本；以及
- 陈旧、拆除和重用。

在最初设计阶段，使用寿命设计将被用于预测耐用性和性能劣化。如图-3 (a) 所示，虽然有许多替代方案，但对于如何保证结构性能的基本概念必须根据条件、设计使用寿命、结构特点、材料特性、评估和干预的难度、以及社会和经济方面的重要性等充分考虑。对于港口和码头钢结构而言，钢的腐蚀是在最初设计时需要考虑的性能劣化的主要原因。因此，我们应充分考虑钢材本身的腐蚀和 / 或腐蚀保护系统的劣化。一般情况下，我们不必担心港口和码头钢结构的疲劳。

维护是针对劣化的主要对策，通过维护来评估钢结构的当前状况，并量化结构性能的水平。此外如图-3(b)所示，通过预测结构性能劣化的未来进展，对于寿命周期成本的最小化、或根据预算上限获得结构性能恢复的最大化，应选择最合适的措施方法。在维护阶段，维护人员最初将遵循设计阶段已设想的方案。如上所述，为了实现战略性维护，应妥善制定维护对策作为 LCM 方案。使用寿命设计或耐久性设计在初始设计时基于大量假设完成。因此，对于设计的输出需要通过维护工作进行验证，因为包括腐蚀的劣化进展不会符合设计假设。这是有关 LCM 方案更新的内容。应对该方案更新，以反映结构的实际情况和条件变化。

图-1 结构的寿命周期

图-2 寿命周期管理系统

图-3 LCM 方案

LCM 方案

我们以图-4 所示的开放型桩柱边缘码头为例介绍 LCM 方案的构建例。码头的分结构由钢管桩构成，关于其直径和壁厚，DL-18m 以上的部分为 1500mm 和 19mm，DL-18m 以下的部分为 1500mm 和 15mm。根据钢的腐蚀速率，我们采用了如图-5 所示的数据，该数据是在邻近码头 26 年期间测量获得的。腐蚀的进展一般随不同的位置而不相同。因此对于该图所示的最大值、平均值、最小值应考虑使用概率方法处理。

为了应对这种腐蚀的风险，我们制定了 4 个 LCM 方案：

- S1: 无防腐蚀措施
- S2: 涂层(DL+2.5~-1.0 m)
- S3: S2+S4
- S4: 阴极保护(DL-1.0~-12 m)

涂层和阴极保护系统的设计寿命设为 50 年。事实上，我们可以根据防腐蚀系统的设计寿命来考虑很多方案。阴极保护的腐蚀防护效率设在 90%。

关于结构性能，对 1 级和 2 级地震动采用 push-over 分析和动态响应分析进行验证。由于钢桩的腐蚀，导致的码头不良的概率增加。随时间推移对 1 级(a)和 2 级(b)地震动发生的不良概率如图-6 所示。对于 1 级和 2 级地震动，不良概率的最大允许值分别设为 0.0038 和 0.01。因此，在达到该数值之前，需要进行加固来恢复性能。作为这些方案，在 50 年的设计服务年限期间，对 S1 需要加固 3 次（对 1 级为第 16 年和第 30 年，对 2 级为第 44 年）。对 S2 需要加固两次，对 1 级为第 36 年，对 2 级为第 45 年。对 S3 无需加固，对 S4 仅对 1 级在第 16 年和第 33 年加固两次。按照该计算，采用钢板焊接进行加固。运用加固技术，可良好地恢复承载能力，但由于采用了水下湿法焊接，与初始值相比，延展性降低了约 40%。

设计人员应在各种方案中选择最佳方案。对于选择，最适合的指标应通过客观判断决定。寿命周期成本将成为该指标之一，对此内容将在以后介绍。

图-4 开放型桩柱码头的个案研究

图-5 腐蚀速率的变化

图-6 因钢桩的腐蚀而增加的不良概率

评估与评价

由于造成港口钢结构性能劣化的主要起因是钢的腐蚀，因此在使用寿命期间应监视腐蚀的进展。由于材料的非均匀特性和环境条件的多样性，腐蚀的进展情况随其位置有很大不同。我们采用实际的腐蚀数据，对 LCM 方案进行更新。

检测与使用期间相关的劣化对于了解结构状态非常重要。首先，我们可以在其表面上发现涂层和其他腐蚀保护系统的劣化。检查和调查的水平将影响结构性能评估的方法。评估可由基于条件的概念和基于性能的概念构成。基于性能的概念可用于性能评估，但一般要求费用和先进技术等。由于其可行性，基于条件的评估可勉强接受。分级系统被经常采用，对其中的劣化状态使用劣化等级进行评估和判断。

目视检查已最常用于对结构的条件进行分级，以判断是否需要进一步的详细调查。对于妥善的分级应定期进行检验。如果将劣化等级与结构性能建立联系，我们可以间接进行性能评估。目视检查仅能够提供结构构件在外观上的变化，但对结构性能需要尽可能地精确评估。如果能够找到结构性能（结构能力）和劣化等级之间的关系，至少是错误的允许余量，我们就可以通过劣化等级讨论措施。

若目视检查不足以提供适当的数据进行评估，则建议进行详细检查。详细检查或调查包括采用非破坏性或破坏性技术等劣化程度的量化。如果数据的质量和数量能够满足用于数值分析，则可直接评估。如上所述，由于劣化存在相当大的变化，因此对这种变化需要进行精确地量化。

方案的更新

我们将某些理论规则、模拟模型、以及验证公式等用于预测劣化的进展。然而通过定期的维护工作可观察到这种趋势，例如，测量的腐蚀速率有可能在维护阶段用于预测未来劣化和 / 或退化的进展。基于数据和评估结果，需要修改劣化和 / 或性能退化的规律和过程，对方案进行更新来进行进一步的预测。

(7~9 页)

在海洋环境下因钢材腐蚀对涂层劣化造成的缺陷及曝露条件的影响

东京工业大学研究生院工学研究科

教授 大即 信明, 副教授 西田 孝弘

海洋环境下的钢材腐蚀

由于海洋中的钢结构体曝露在严重的腐蚀环境中, 因此理解因腐蚀导致的劣化进展, 确立预测性能降低具有重要意义。此外, 为了在较短期间评估长期发生的劣化进展而提出了促进试验方案。然而, 曝露条件及促进条件对因腐蚀发生的劣化进展产生的影响不明, 因此, 促进时间在实际环境中相当于何种程度的时间、即“促进倍数”不明。尤其是作为以往的研究, 着眼于钢材中发生的均匀腐蚀(微观腐蚀电池)的事例较多, 以局部腐蚀(宏观腐蚀电池)为对象讨论劣化进展的事例不多。本文针对上述课题, 介绍从涂层劣化的观点出发整理的笔者等的讨论结果。

海洋环境下的钢材腐蚀

关于无涂装的钢材在海洋环境下的腐蚀, 迄今已有很多讨论事例。例如, 我们获得了如图-1(a)所示的结果, 众所周知, 在 HWL 上部(飞沫部位)及 LWL 下部的腐蚀速度加快。海洋环境下无涂装钢材的腐蚀是因存在腐蚀速度加快部位(主要为阳极部位)和减慢部位(主要为阴极部位)的宏观腐蚀电池导致腐蚀发生进展。为了防止这种腐蚀, 一般对海洋的钢结构体采用涂装等防腐蚀工艺。

涂装的主要防腐蚀机制是, (1) 隔断 Cl^- 、 O_2 、 H_2O 等造成腐蚀原因的物质, (2) 抑制腐蚀生成物的反应场形成等。通常认为, 如果涂层完整, 则涂层不易发生劣化, 因船舶等的冲撞形成损伤部位, 在该部位发生了腐蚀(主要为微观腐蚀电池)。然而如图-1(b)所示的实际环境曝露试验结果(骏河湾, 20 年曝露)表明, 涂层发生起泡及破损等劣化, 腐蚀范围扩大。笔者等将该现象考虑为主要的起因是宏观腐蚀电池, 我们采用了如下章所示的特殊试件(采用切割钢材、可测量宏观腐蚀电池电流的试件)进行了讨论。

寿命周期成本

如果构件不良则可能造成安全危害, 我们应对可能出现的不良按其后果分类。当判定不良的后果非常严重时, 为了降低在设计寿命内发生不良的风险, 可能需要对特定的构件进行长寿命设计, 或加强对检查和维护的要求。为了确定 LCM 方案, 包括适当的时机和措施方法, 寿命周期成本的估测是最佳指标之一。寿命周期成本的计算基于各种假设, 但它对维护的未来方向提供了决策所需的重要信息。在计算中, 我们计算初始成本、以及包括检查费用和计划干预的维护成本。

寿命周期成本估测可使比较成本评估在一个指定的期间内进行。由于能够比较替代 LCM 方案的成本, 因此可以选择最经济的总体策略。

4 个 LCM 方案的寿命周期成本计算如图-7 所示。由于加固需要成本, 在即将达到不良概率的允许最大值时, 相应的成本增加。该图表明, 预防性维护策略的成本最低, 是代价最高的方案的约三分之一。在 50 年期间, 最经济的方案是 S3, 其次的顺序为方案 S4、S2、S1。这意味着防腐蚀的效率(预防措施)从成本的角度考虑应是最好的方案。然而, 如果计划的使用寿命短于 50 年, 最佳解决方案可能会随使用寿命而不同。

图-7 寿命周期成本计算

结语

寿命周期管理系统, 包括结构性能的评估和预测劣化的进展, 是修建和维护结构的最佳工具之一。笔者预期, 开展合理和有效的维护, 以降低寿命周期成本, 获得性能的最大化, 由此实现港口和港湾结构的可持续化。为了进一步开发本系统, 有必要对现有结构进行准确的结构性能验证研究, 包括检查和调查的方法以及精确地预测劣化和性能退化在未来的进展。



图-1 海洋环境下的钢板腐蚀的分布

腐蚀对涂层劣化产生的影响以及其进展机制

图-2 是微观腐蚀电池腐蚀及宏观腐蚀电池腐蚀的概念图。如图所示，微观腐蚀电池腐蚀是发生铁的溶解反应的阳极反应、以及消耗氧和水、生成氢氧化物的阴极反应均匀发生。作为对这种情况的评估方法，一般采用基于通过交流阻抗法等获得的分极电阻进行评估，Stern 等提出了从分极电阻向微观腐蚀电池电流密度的换算方法，得到了广泛应用。另一方面，作为宏观腐蚀电池的腐蚀，是阳极反应在局部发生的腐蚀，对于其评估，需要测量从阴极部位流向阳极部位的电流。但是直接测量流经钢材的电流比较困难。对此，笔者等制作了如图-3 所示的切割试件，提出直接评估从阴极部位流向阳极部位电流的方法进行评估。

采用邻苯二甲酸系涂料（厚度：150 μm）涂层的有缺陷试件的（a）宏观腐蚀电池电流密度及（b）微观腐蚀电池电流密度随时间的变化如图-4 所示。经确认，在曝露初期，以损伤部位的微观腐蚀电池电流密度为主，涂层部位的负电流密度（阴极电流密度）逐渐增加，损伤部位的宏观腐蚀电池电流密度随着曝露期间的增加而升高。此外，检查起泡部位内部的 pH，确认为 10~13 的高碱性环境，表明了涂层下部因阴极反应而发生、蓄积了 OH⁻的可能性。鉴于上述状况，对于起泡及破损等涂层的劣化，可认为宏观腐蚀电池腐蚀的阴极反应产生了较大影响。

对于上述现象，可认为涂装钢材的劣化按照表-1 所示进展。特别作为起泡的发生时期，由于与此后的腐蚀部分的扩大密切相关，因此确定该时期极为重要。对此，我们在下章中介绍通过将促进试验结果与实际的曝露试验结果比较，根据促进试验计算对于实际的曝露环境的促进倍数的尝试。

图-2 微观腐蚀电池腐蚀与宏观腐蚀电池腐蚀的概念图

图-3 切割钢板试件的概要

图-4 有缺陷的涂装钢板试件的微观腐蚀电池腐蚀和宏观腐蚀电池腐蚀随时间的变化

表-1 涂装钢材的劣化进展

促进试验结果与实际时间换算和妥当性验证

对存在损伤部位的涂装钢材进行促进试验（50℃ 盐水浸泡）与曝露于实际环境的构件至发生起泡的期间进行整理如表-2 所示。据此，将根据促进试验结果预测的数值与实际的曝露试验结果一致，因此可认为采用这种方法的促进试验结果与实际时间的换算妥当。

表-2 存在损伤部位的涂装钢材的促进试验和曝露于实际环境的构件至发生起泡的期间

总结

以上我们介绍了笔者等对在海洋环境下因钢材腐蚀对涂层劣化造成的缺陷及曝露条件的影响进行的讨论结果。关于曝露于实际环境中的钢结构体的腐蚀，是我们工程技术人员的紧要课题，尚存在许多不明确的问题。如果本讨论内容能够对今后构建维护管理系统、乃至对社会基础设施的长寿命化做出贡献，我们将感到无比欣慰。



（10~12 页）

存在腐蚀损伤的钢结构体的剩余承载力评估与性能预测

广岛大学研究生院工学研究院社会环境空间部门
教授 藤井 坚

港湾的钢结构体处于特别严峻的腐蚀环境，因此强度随着腐蚀耗损降低成为安全上的重要问题。对此，我们以发生了腐蚀的钢管桩的剩余承载力评估及未来预测为例，阐述笔者等的研究成果。

腐蚀状况的掌握

为了正确评估或预测结构体的剩余承载力，我们需要掌握腐蚀的现状。对钢材表面的凹凸坐标以及壁厚进行的测量越精细、越正确，越可以正确评估剩余强度。例如，采用 3 维激光测量仪（照片-1），

虽然能够以高精度精细测量表面坐标，但在实际中大多采用超声波壁厚仪等测量壁厚，表明多点测量存在难度。评估钢管桩断面的平均壁厚时，如图-1所示，采用断面内的4处位置、在各处位置取5点、合计20点的测量结果，对断面平均壁厚 t_r 若按照 $t_r=t_{avg}-S$ 计算，则可基本上做出有安全余量的评估。这里， t_{avg} 、 S 分别为20点壁厚的平均值及标准偏差。

照片-1 根据3维激光测量仪的测量结果获得的表面形状

图-1 钢管桩断面的壁厚测量点

剩余承载力评估

为了评估发生腐蚀的钢结构体或构件的剩余强度，目前，有限元分析可称是最适用且可靠性高的方法。图-2及图-3是曝露于海洋19年的6根钢管桩的剩余抗压承载力的相关解析结果和试验结果的比较。我们按照弹塑性大变形有限元进行分析，这时，腐蚀表面坐标采用了大约以1mm网格的间隔测量的结果。通过这些图可以看出，只要采用正确的腐蚀表面测量结果进行分析，就能够以高精度评估剩余强度及破坏形态。

另一方面，也可以根据壁厚测量结果的统计值求出评估壁厚，将评估壁厚用于无腐蚀时的强度评估公式，求出剩余承载力。如图-4所示，将通过壁厚测量结果的平均值与标准偏差获得的平均壁厚作为（平均值-0.8×标准偏差），代入宽厚比参数 R_t ，通过无腐蚀的压曲承载力曲线求出承载力 $\cdot u$ ，可评估腐蚀钢管的剩余抗压承载力。但是我们应该注意，虽然作为有限元分析可进行了全部压曲形式的剩余强度评估，但采用简易评估时，只能对特定的压曲变形方式的剩余强度进行评估。也就是说，图-4仅考虑了局部压曲强度，没有考虑钢管桩的总体压曲强度。

图-2 发生了腐蚀的钢管桩剩余抗压承载力的有限元分析与试验结果的比较

图-3 发生了腐蚀的钢管桩的压曲状况（飞沫带部位）

图-4 采用压曲承载力曲线的简易剩余承载力推定

未来的预测

为了实现最低寿命周期成本，有必要预测钢结构体的剩余承载力随时间的变化，对未来的维护管理做出规划。如果能够通过简单的模型表示随着防腐性能降低以及腐蚀进展发生的经时性钢材表面的凹凸形状，则可预测未来的强度降低。作为该腐蚀表面的生成模型，如图-5所示，将钢材表面分格，以各格子点的腐蚀深度表示腐蚀表面。对钢材表面设定一个模型，即在1年期间有一定数量、具有一定强度和影响范围的防腐蚀劣化因子和腐蚀因子随机落在钢材表面，使防腐性能降低，当超过阈值后，腐蚀因子作用于钢材表面导致发生腐蚀耗损。对于防腐性能劣化因子以及腐蚀因子的参数（强度、影响半径、每年落下的个数），可根据实际发生的腐蚀状况的测量结果获得。通过该模型可对腐蚀表面的未来进行预测，如果使用该腐蚀表面形状通过有限元分析等进行强度分析，就可以进行剩余承载力的未来预测。此外，如果对涂装进行重新喷涂，则更新防腐蚀功能的数值。

从初期的涂层状态经过了一定的年数，底层金属露出的状态及残存板厚等高线的模拟结果例如照片-2及照片-3所示。图-6是采用腐蚀表面预测结果对钢管桩的抗压强度进行分析的结果。如图-6所示，可采用本方法进行具有说服力的承载力降低预测模拟。

在设计当初，由于假设参数进行预测，因此当初的预测结果的可靠性最低。提供使用后，根据定期检查的结果修正参数以符合实际，如果更新承载力的劣化曲线，就可以提高此后的预测精度，若以此为基础制定维护管理计划，我们认为最终可实现LCC最小化。

图-5 腐蚀深度形状的模型化

照片-2 涂层劣化状况的分析例（黑色部分为底层金属露出部位）

照片-3 重新喷涂涂层的期间与100年后的剩余壁厚分布的模拟结果（海中部分）

图-6 重新喷涂期间和强度降低预测的模拟结果（海中部分）

致谢

本项研究通过社团法人日本钢铁联盟获得了特定研究资助金，作为土木学会钢结构委员会 关于沿岸环境的钢、复合结构体的防腐蚀及耐久性评估研究分会（负责人：渡边英一）活动的一部分实施。我们在此对给予支援的各位委员、以及相关机构表示感谢。



（13~15 页）

同时也考虑维修后性能的港湾钢结构体寿命周期性能评估技术

名古屋大学研究生院工学研究科社会基础工学专业
教授 伊藤 义人，副教授 北根 安雄，
助理教授 广畑 干人

老朽化的港湾钢结构体的长寿命化

为了合理维护管理老朽化的港湾钢结构体，实现长寿命化，以高精度掌握维修前后的性能，评估设计使用期间的寿命周期性能，进行检查和维修等非常重要。笔者等采用以往腐蚀劣化的钢管桩为对象，着重关注钢板焊接修理，开展了修理后承载力性能评估以及耐久性评估。本文简要介绍与此相关的研究内容。

经钢板焊接修理后的钢管桩的承载性能

图-1 所示的钢板焊接修理工艺，是对发生了腐蚀的钢管桩及钢板桩进行修理和加强的典型工艺，使用拼接钢板覆盖腐蚀耗损部分，对原有钢材和拼接钢材采用填角焊焊接。如果发生腐蚀耗损的部位位于海水中，也较多采用湿式水下焊接。干式与湿式的焊接环境不同，有关对焊接部位特性造成的影响，有报告指出，水下焊接的焊接缺陷较多，水下焊接与空气中焊接相比，焊接部位的硬度较高，断裂延伸减小等。对钢管和钢板桩的母材进行填角焊强度试验，也获得了相同的结果。如图-2 所示，水下焊接的静态强度与空气中焊接相比虽然增加，但是变形性能大幅降低，与钢管相比，这种影响对钢板桩更加明显。

此外，我们对采用切削进行人为耗损的钢管进行钢板焊接修补试验，讨论修补后的抗压或抗弯承载性能，采用按现行设计方法设计的钢板焊接修补，对抗压或抗弯载荷的刚性及承载力可恢复到与腐蚀劣化前基本相同的程度，但变形性能与腐蚀劣化前相比降低。通过抗弯承载试验获得的荷承载-变位曲线如图-3 所示。

虽然采用上述方法修补的钢管桩的静态强度可恢复到与腐蚀劣化前基本相同的程度，但发生地震时承受交变荷载，此时的能量吸收性能至关重要。对外径 216.3mm、壁厚 12.7mm 的钢管，通过复合非线性有限元分析进行抗弯承载分析，获得的滞后回线如图-4 所示。图-4(a)是无损伤钢管，图-4(b)是在 150mm 长的部分均匀切削 6mm 的钢管，图-4(c)是对(b)的切削 6mm 钢管采用 6mm 钢板进行了修补焊接的钢管，图-4(d)是采用 9mm 钢板修补的钢管。由此可见，为了恢复到与无损伤钢管相同程度的能量吸收性能，需要采用超过腐蚀耗损壁厚的拼接钢板进行焊接。

图-1 钢板焊接修补工艺

图-2 空气中焊接与水下焊接的强度和变形性能的相对变化

图-3 抗弯载荷试验获得的钢管承载-变位关系

图-4 抗弯载荷试验获得的钢管承载-变位曲线

使用海水进行的气泡试验获得的焊接部位的腐蚀特性

为了明确寿命周期性能，需要掌握修补后的腐蚀耐久性。对以钢板焊接修补的钢管桩，表面采用被覆防腐措施。对钢板焊接修补后的修补钢管桩，采用凡士林被覆及安装 FRP 套筒的实例如照片-1 所示。对这种被覆防腐措施可考虑 20 年左右有效，但若 FRP 套筒因漂浮物等发生破损、凡士林被覆材料流出，则修补部位暴露于腐蚀环境。对于钢材在海水中的腐蚀特性虽然进行了大量研究，但由于对钢材的一般部位与焊接部位的腐蚀特性的比较验证的实例较少，因此我们采用气泡腐蚀促进试验（3% 食盐水溶液，50℃，28 天），对焊接部位的腐蚀劣化特性进行了讨论。我们使用的腐蚀试验装置的概要如图-5 所示。试件钢材的母材为 SY295 和 SYW295 两种规格，拼接板为 SM490。分别采用软钢、高张

力钢、以及低温用钢被覆弧焊焊条 E4319，对拼接板和母材进行填角焊。

对于焊接部位的腐蚀量，使用激光深度仪测量试验前后的表面形状，获得试验前后的形状差。某试件的焊接部位耗损量如图-6 所示。焊接部位发生了均匀腐蚀，在焊道表面凹凸部位及焊趾部位等发生了局部性明显腐蚀。另外，焊线方向（前面或侧面填角焊）、母材的材质、焊接环境（空气中或海水中）对腐蚀量没有产生影响。此外，焊接部位的腐蚀量与平坦的一般部位的腐蚀量相同。

照片-1 对用钢板焊接修补后的修补钢管桩采用凡士林被覆及安装 FRP 套筒

图-5 水下腐蚀促进试验系统

图-6 腐蚀造成的焊接部位表面形状的变化

总结

以掌握钢管桩的寿命周期性能，开展港湾钢结构体的寿命周期管理为目的，我们对钢板焊接修补后的腐蚀钢管桩的承载力性能进行了讨论。今后，除了钢管桩之外，我们还计划对栈桥结构总体在修补后的承载力性能进行评估。



（16 页～封底）

发生了腐蚀劣化的港湾钢结构体的剩余承载力的评估方法

京都大学研究生院工学研究科社会基础工学专业

结构工学讲座

结构力学领域

教授 杉浦 邦征

前言

作为四面环海的日本，港湾设施对于经济、社会活动的顺利开展，发挥着极其重要的作用。一般而言，港湾设施作为物流用途的设施，由码头等系留设施、航道及锚地等水域设施、以及为了保证港湾区域的安全和放心的防波堤等外围设施构成。这些设施应充分发挥各自的功能，并相互有效配合，

才能使港湾自身完成其使命，然而建成后已经过了 30~50 年，今后，对这些设施的维护管理费用无疑将会迅速增加，因此，妥善维护管理港湾设施成为重要的课题。

尤其作为日本，道路设施、河流管理设施、以及港湾设施等社会资本在高度经济成长期集中修建，因此国土交通省以管辖的社会资本（公路、港湾、机场、公共出租住宅、下水道、城市公园、水利设施、海岸）为对象，根据以往的投资状况等推测今后的维护管理和更新费用，维护管理及更新费用将于 2037 年度超过投资总额，试算结果表明，在从 2011 年度至 2060 年度 50 年期间的必要更新费（约 190 兆日元）中，约 30 兆日元（总体必要金额的约 16%）无法更新。这意味着有必要以尽可能小的负担实施有计划且战略性的维护管理，作为既有设施的有效利用、以及通过妥善的维修等对策实现结构体寿命延长的技术，需要及早确立寿命周期设计以及寿命周期管理技术。也就是说，不仅需要新设计、施工、运营便于检查和监视的设施，而并且对既有设施也通过早期发现和维修，致力于实现设施总体长寿命化的“预防性维护管理”非常重要，需要通过开展可期待高耐久性的材料和结构的运用，计划和实施长寿命化计划，妥善利用社会资本，推进长寿命化对策等，实现总体成本的降低。

图-1 针对设施长寿命化采取的措施

关于钢板桩及钢管桩对码头等开始用于港湾设施，钢板桩为昭和元年（1926 年），钢管桩为上世纪 50~60 年代，由于对水边工程可迅速施工，因此目前被广泛利用。这些港湾钢结构体与海水接触，处于直接受到潮位变动及波浪飞沫影响的严酷环境，表现出与陆地钢结构体不同的腐蚀特性，随着钢材在港湾环境下的用途扩大，我们开展了探明腐蚀机理及各种腐蚀对策、以及维修和加强工艺的讨论。在确立防腐蚀技术之前，存在许多设计了腐蚀余量的无防腐蚀结构（不抑制钢材的腐蚀而增加壁厚的设计方法），然而目前几乎对所有的新建结构体采用了电化学防腐蚀或涂覆等防腐蚀工艺。因此，在这些港湾钢结构体提供使用期间，需要保持防腐蚀工艺的防腐蚀功能，进行定期检查等，随时掌握结构

体的剩余性能，避免因钢材的腐蚀损害对结构体要求的功能。

另一方面大家知道，因腐蚀造成港湾钢结构体各部位的钢材耗损，构件及结构体总体的承载性能降低。因此，对发生腐蚀劣化的钢结构体的剩余结构性能进行妥善评估，对于维护管理至关重要，关于对港湾钢结构体剩余承载性能的评估，提出对各项指标采用试验和分析方法评估在各断面力作用下的构件承载力的方案。然而其大部分是着眼于结构体构件的一部分进行试验及分析，几乎没有开展对结构体总体的评估。对此，本报告以由图-2 所示的钢管桩和 RC 平台构成的栈桥结构（为了构成平面框架，实际采用了 3 根钢管桩的模型）为对象，讨论发生了如图-3 所示的腐蚀劣化的钢管桩对栈桥结构的总体水平承载力产生怎样的影响，对讨论结果进行了总结。此外，作为钢管桩的腐蚀特性，我们对从曝露于海洋环境约 19 年、发生了腐蚀的钢管桩取出的钢管试件使用激光变位仪进行形状测量，作为既有的腐蚀形状数据运用。

图-2 钢管直桩式横栈桥的事例

图-3 海洋钢结构体垂直方向的腐蚀倾向

采用 FEM 对发生了腐蚀的钢管直桩式栈桥的分析

作为含发生了腐蚀的钢管桩的栈桥总体模型，采用 3 根钢管桩（外径 800mm、壁厚 16mm）等间隔并列配置构成平面框架结构（高 10.2m、桩间距离 6.5m），令其腐蚀劣化方式变化，对包括钢管桩的平面框架的水平承载力产生的影响进行了讨论。另外，我们采用通用有限元分析代码 ABAQUS（Ver. 6.10）进行了分析。作为含发生了腐蚀的钢管桩栈桥模型，在 FEM 分析中构建的平面框架模型如图-4 所示。对钢管外径 2.75 倍的钢管桩基础部位及钢管桩外径 2.25 倍的钢管桩上部按壳元素（4 节点降阶积分壳元素）模型化，将其中间部分按梁元素模型化。此外，壳元素与梁元素在节点处刚性连接，对壳元素在钢管圆周方向的分割数取 150，在构件轴方向也同样按相同的尺寸进行了元素分割。将 RC 平台作为弹性体，与钢管桩上部的壳体部分刚性连接。关于边界条件，完全固定各钢管桩的基础部分端面，在底板总体水平面内方向施加最大水平变位 1000mm。关

于钢管，设定 SKK490 的钢号，关于其壁厚，作为壳元素在各个元素的节点输入壁厚，作为梁元素在各个元素使用平均壁厚，输入作为外径相等空心圆形断面的断面各项参数。我们分只有 1 根钢管桩的模型 A、3 根钢管桩的腐蚀方式均相同腐蚀的框架模型 B-1、只有 1 根钢管桩腐蚀量较大的框架模型 B-2 三种情况进行了分析。关于模型 A，与使用了平面框架的钢管桩同样制作，将钢管桩上部端面作为刚体面，对上部端面设刚体元素，束缚刚体元素回转，至最大水平变位 1000mm 进行了分析。这里，关于各模型的腐蚀量，根据壁厚的实测结果，以腐蚀量为基准按 0 倍、（无腐蚀）、1 倍、1.2 倍、1.4 倍、1.6 倍、1.84 倍进行变化，分别分类为 a、b、c、d、e、f，对分析模型案例以 B-[○]-[△]-[□]表示（对○：左端桩，△：中央桩，□：右端桩的腐蚀方式用 a~f 标记表示）。此外，由于在圆周方向的腐蚀状况不同，因此对于模型 A，将水平荷载的加载方向按 45 度间隔变化，确认水平承载力为平均 548kN（最大 559kN，最小 537kN），变动幅度对于平均值集中在 4%左右。

图 4 栈桥的平面框架结构的元素构成

图 5 承载—变位关系例

水平承载—水平变位关系的一例（B-1 模型）如图-5 所示。与曝露 19 年的腐蚀进展相比（B-b-b-b），承载力比健全时（B-a-a-a）减少约 14.2%。另外，使腐蚀量增加 1.2 倍（B-c-c-c）、1.4 倍（B-d-d-d），承载力分别与健全时相比，进一步减少 18.3%和 25.7%。关于最大承载时的变位也同样，与健全时的变位相比，随着腐蚀量的增加而减小。另外，随着腐蚀的进展，各钢管桩的轴力分担出现各种变化，钢管桩的局部压曲性状、承载力性状出现很大不同，需要进行结构总体的结构性能评估。另一方面，采用 B-2 模型，使发生了腐蚀损伤的钢管桩变化，即使仅有 1 根钢管桩的腐蚀严重，由于其余的钢管桩可分担承载，由此得知结构物整体的承载力取决于整体的总腐蚀量。

根据现场测量进行发生了腐蚀劣化的栈桥性能评估
假设根据现行的防腐蚀、维修规程对钢管桩的

壁厚进行现场测量，决定了在本研究中作为对象的栈桥模型的腐蚀钢管桩的代表壁厚。选择步骤为从飞沫带、干满潮带、海中部分选择具有最小壁厚的断面，以其最小壁厚点为起点，在同一断面内选定4个方向或8个方向的测定中央点(参照图-6)。另外，以各测量中央点为起点，在10cm见方范围内，取包括距离中央点纵横约相距3.2cm的4处合计5点，将该平均值作为现场测量的壁厚评估结果(请参照图-7)。

分析对象仅取1根钢管桩(外径406.4mm、长10.5m、初始壁厚9mm、钢材规格SKK490)。另外，作为分析模型，Ave-[]是使用了如图-8所示的各区间平均壁厚的模型，4d为以最小壁厚为起点选定测定中央点时，在圆周方向选定4点壁厚测定点的模型，8d为选定了8点的模型。另外，B-[]-[]-[]不是采用各区间的平均板厚，而是按照壁厚测定方向纵向分割区间的模型。在各分割区域，输入了作为测定值计算的壁厚。关于[]，从左侧开始依此为飞沫带、干满潮带、海中部分的壁厚测定方向的数量。另外，s-Det为详细再现了腐蚀性状的模型，对于没有进行壁厚测定的位置，虽然含平均壁厚及线形插入等假设，但设想壁厚的测量最详细，钢管桩的水平承载力以最高的精度评估。

图-6 在高度方向、圆周方向的测定位置例

图-7 在10cm见方范围内的壁厚测定方向

图-8 根据设定的现场测量的钢管桩模型的承载—变位关系

各分析模型的承载—变形关系如图-8所示。这里，与s-Det的水平承载力相比，与Ave-4d、B-4-4-4的承载力误差为16.8%和13.1%。作为按现行规定进行的现场测量，对1个断面设4处测定点，与实际的承载力相比，以相当的安全余量(较低)评估。这是将具有最小壁厚的断面壁厚作为飞沫带全域的钢管桩壁厚输入，将比实际壁厚小的壁厚适用于全部领域，为了以更高的精度进行剩余承载力评估，我们认为再现受到发生弯矩的强烈影响、且壁厚差异较大的飞沫带的局部强度极为重要。另外，对飞沫带及干满潮带的测量断面数增加2或3个，根据与s-Det的比较结果，由于测量断面数的增加，可

获得比s-Det更接近的承载—变位曲线。对此可认为由于增加了各区间的测量断面数量，能够在一定程度上正确计算各区间的平均壁厚。由于这个原因，虽然在现场的测量存在难度，但希望对判断为腐蚀特性类似的各区间的数个断面实施壁厚测量。另一方面，可认为对1个断面在各相隔90度的4处测量壁厚能够充分满足要求。

总结

实施钢管直桩式栈桥结构平面框架分析的结果表明，腐蚀损伤显著的钢管桩位置对承载力的影响较小，总体承载力取决于总体的腐蚀量。根据按现行规定在现场进行的钢管桩壁厚测定进行剩余承载力评估的结果表明，与将腐蚀详细地实现模型化时的承载力比较，虽然发现了13%以上的差异，但可在保留安全余量的条件下获得承载力。此外，虽然对一个断面内的壁厚测量位置取4个已足够，但尤其对于剩余壁厚的波动较大的飞沫带等情况，使用标准偏差修正测量壁厚是有效的方法，因此希望实施数个断面的壁厚测量。今后，我们将根据有限的现场测量结果，进一步详细讨论能够以较高的工程精度评估栈桥结构的剩余承载力的现场测量方法。