

# STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(第 42 期, 2014 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 42 期 (2014 年 8 月) : 目录

---

土木结构体的设计标准 — 性能设计和可靠性设计规范以及今后的方向 —	1
英国的钢桥板疲劳损伤及维修事例调查报告	4
东海道新干线钢结构桥的维护与加固	8
首都高速公路的维护管理	12
从 RC 桥板向钢桥板的更换: 美川大桥	16
日本钢铁联盟的活动	封底

---

注: 页数为英文版第 42 期的页数

中文版: ©一般社团法人日本钢铁联盟 2014

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)

## 土木结构体的设计标准 — 性能设计和可靠性设计规范以及今后的方向—

岐阜大学 工学部 教授

本城勇介

本文的目的是简要介绍有关日本土木结构体设计标准在最近 15 年期间的发展动向,并阐述今后的展望。本文中的关键词是“性能设计”和“可靠性设计规范”。关于“性能设计”,根据 JGS4001-2004 的词汇定义,“性能设计(Performance Based Design):对于结构体,不是根据其规格、而是根据其社会性要求的性能进行规定和设计的设计构想”。

### 采用可靠性设计规范和性能设计的过程

#### ◆根据可靠性设计规范采用设计标准

可靠性设计规范、即限界状态设计规范向设计标准的采用可追溯到上世纪 70 年代。当时在欧洲开始推进制订全欧洲统一的建筑物以及社会基础设施的设计标准,这就是目前的 Structural Eurocodes (欧洲结构规范)。出于“好马配好鞍”的考虑,将根据在该时期已基本呈现集大成的可靠性设计规范的审核规范采用于该标准。众所周知,经过近 40 年的准备期间,终于在 2010 年完成并施行。

另一方面在北美也同样,1983 年制订的安大略公路桥梁设计规范(Ontario Highway Bridge Design Code,简称 OHBDC)是基于正式的可靠性设计规范的设计标准,在其影响下,作为北美土木相关设计标准中最权威的 AASHTO 桥梁设计规范(Bridge Design Specifications,简称 BDS)也从上世纪 80 年代后期开始推进作业,1995 年发行了 LRFD 版的 AASHTO BDS。此后直到目前进行了不断修改。

与以上欧洲及北美的发展相比,日本根据可靠性设计规范制订部分系数型审核规范的设计标准大幅滞后。明确根据该方针作为土木结构体的设计标

准首次制订的是 2007 年的《港湾设施的技术相关标准》。虽然对日本的土木结构体设计具有最强影响力的道路桥示方书在当时没有采用部分系数规范,但是目前正在全力推进修改作业,不久将会修改成为大幅采用基于负荷及强度系数设计规范(LRFD)的审核公式的内容。

与北美及欧洲相比,虽然日本将可靠性设计规范向设计标准的采用滞后,但是该采用具有与其他各国不同的显著特点。也就是这些设计标准重视被称为性能设计的框架,在此基础上,将可靠性设计规范规定为审核方法采用。我们在下节说明性能设计采用的过程。

#### ◆性能设计采用的过程

纵观全球,性能设计至少存在两种源流(图 1)。一种起源于 Nordic 5 Level System。为了对建筑标准进行国际性调查,出于将性能要求实现阶层化、划分为强制规定部分和非强制性的参照部分的考虑,是与 WTO / TBT 协定的“不是根据规格的规定、而是根据性能的规定”内容均密切相关的方针。另一种是以美国加州结构工程师协会(SEAOC, 1995)的 Vision 2000 性能要求矩阵(图-2)提案为起源的方针。该提案吸取北岭和洛玛-普雷塔两次地震受灾的教训,作为建筑物业主与结构技术人员进行结构体抗震性能的沟通手段提出。

目前在日本发生的、以基于性能设计概念采用可靠性设计规范进行结构体审核为基础制订设计标准的起源可归结为于 1995 年生效的 WTO / TBT 协定。日本政府以此为契机,实施大幅度限制松绑政策。其中的一环是通过政策推进各项工业标准的国际整合化、性能规定化以及排除重复检查等的结果。

与其对应,学会也在早期开展了掌握根据 WTO / TBT 协定向设计标准采用性能设计概念动向的工作。例如,地盘工学会于 2004 年制订的《地盘规范 21》以及土木学会于 2003 年发行的“规范 PLATFORM”等,对后来的各种设计标准的修改产生了影响。

性能设计与可靠性设计规范的定位如图3所示，并在概念上说明了与WTO / TBT协定以及ISO标准的关系。性能设计是根据国际性通商政策方面共识的框架，作为今后的设计规范，将根据性能规定提出结构体的性能要求，对于该审核采用由ISO2394等国际标准规定的可靠性设计规范进行。

图1 可靠性设计的两种源流

图2 SEAOC VISION 2000 的性能要求矩阵

图3 WTO / TBT 协定、性能设计以及可靠性设计规范

### 日本土木结构体设计标准的现状

如上所述，《港湾设施的技术相关标准》是于2007年根据可靠性设计规范以采用部分系数进行审核为基本修改的标准。关于该修改的概要，例如Nagao等（2009）已通过英文进行了介绍，在此省略。

以下我们以在日本土木结构体市场中规模最大的道路结构体的标准《道路桥示方书》的最近修改为基础，介绍通过修改提出对该标准的构想。

关于修改方案提出的道路桥性能规定的构想如图-4所示。该图表示了关于桥梁承载性能的性能规定概念，对于桥梁的性能要求，以桥梁的状态（按限界状态表述性能）和在设计中考虑的状况（考虑承载的状况、永续、变动以及偶发支配）为两个要点，通过性能矩阵表示。此外，将在设计的使用期间（通常为100年）的任意时刻按照一定的概率满足作为性能要求。这里的“一定的概率”意味着可靠性，可理解为该规定基于可靠性设计的理念。

图-4的下侧表示根据部分系数的审核概念，关于在性能矩阵中指定的承载状况与桥梁的限界状态的组合，采用部分系数的审核公式进行审核。这时采用的方法以负荷阻力系数方法为基本。

目前的修改作业正在根据如图-4所示的概念推进。在作业中对于各个构件，采用可按照性能矩

阵定义的性能要求进行审核的方式开展具体作业。这里包含了许多工程性判断。因此，该修改强调了“认为”的概念。对于一个指定的审核规范，可审核是否满足规定的性能要求是“认为”的含意。同时，“认为”的含意并不表示指定的审核规范是唯一的审核规范，对于其他设计人员认为适当的审核规范也留有余地，这一点同样很重要。

图4 道路示方书修改方案提出的道路桥性能规定化的构想

### 今后的展望

以性能设计为基本，对审核采用基于可靠性设计规范的部分系数方法和负荷阻力系数方法进行，这就是目前的日本主要土木结构体的设计标准动向。这种“以性能设计为基本”的构想是不同于Eurocodes以及AASHTO SSHB的日本独自的方针。

如上所述，这种方针是在当初随着WTO / TBT协定生效由日本政府作为限制松绑政策的一环而采用并发展的。但是就目前的道路桥示方书等的修改作业而言，可以看出这个框架向新的方向发展。

与美国等许多发达国家同样，日本拥有巨大的社会基础设施资源。从上世纪60年代开始加速建设、在70年代至80年代的经济成长期大量建设的社会基础设施的维护管理问题被广泛认为将成为今后的重大问题。

在这种形势下，我们认为以国土交通省为首的日本政府负责该领域的部门预测对于这些陈旧化的社会基础设施难以都按照相同标准进行均等的维护管理。性能设计的概念蕴含着在社会的共识下实现结构体性能差别化的潜在能力，这是在考虑今后性能设计的发展时不可忽视的视点。



(4~7页)

# 英国的钢桥板疲劳损伤及维修事例调查报告

道路技术研究中心 平山 繁幸

横川桥梁株式会社 井口 进

三井造船株式会社 内田 大介

JFE 工程技术株式会社 川畑 笃敬

在日本，我们发现在正交异性钢桥的桥板与槽筋之间的焊接连接处周围发生疲劳裂纹，从焊根开始向焊缝扩展。最近，这些被称作焊缝贯穿裂纹的损伤发生在交通状况严苛的桥梁。有时，该损伤向槽筋或钢桥板扩展，损害桥梁的性能。

1993 年，在阪神高速公路首次报告发现焊缝贯穿裂纹。随着桥梁检查精度和技术的提高，焊缝贯穿裂纹的数量增加。许多机构对其开展了试验性或分析性研究。另一方面，上世纪 70 年代，世界上首次报告在法国的里什蒙桥发现焊缝贯穿裂纹。此外，英国著名的塞汶河桥在相同期间发生了焊缝贯穿裂纹，并采用重新焊接的方法维修。我们还研究了焊缝贯穿裂纹的发生机理和维修方法。此后，关于正交异性钢桥的疲劳裂纹，我们于 2011 年 4 月开展了为期 10 天的现场视察，包括英国的塞汶河桥。我们对塞汶河桥和厄斯金桥进行了现场调查。本文介绍英国的正交异性钢桥疲劳问题的现场调查结果。

## 塞汶河桥和怀桥的概况

塞汶河桥位于英国的西南地区，是一座横跨塞汶河的悬索桥。塞汶河桥与怀桥、欧斯特高架桥以及比齐利高架桥构成塞汶河横越大桥，跨越英格兰和威尔士的分界线。塞汶河桥于 1966 年建成通车。桥长 1,600m，主跨长 988m（照片 1）。根据风洞实验结果，该桥采用流线型截面的箱梁作为加劲主梁。主梁两侧设有人行道和自行车道，同时也是维护车辆用车道（图 1）。桥板厚 11.5mm，采用(B) 305 mm ×(t)6 mm ×(H) 230 mm 的槽筋结构。每隔 4,600mm

设内隔板，槽筋与内隔板焊接。桥板的现场连接采用各纵向和横向的焊接连接。桥面铺设厚 35mm 的沥青砂胶。怀桥是单面索斜拉桥，设有两座桥塔，其结构尺寸与塞汶河桥相同。

照片 1 塞汶河桥

图 1 塞汶河桥的截面

在塞汶河桥落成 11 年后，1977 年在正交异性钢桥板发现了疲劳裂纹。这些裂纹可按其位置分为 3 类：（1）桥板和槽筋之间的焊接连接处，（2）槽筋和横梁之间的截面，（3）槽筋底部和浮运隔板之间的焊接连接处（图 2）。在塞汶河上浮运时，浮运隔板与箱梁构件的各端部连接，防止水漏入。由于完工后没有拆除，因此在槽筋的底部和浮运隔板之间的焊接连接处周围产生了疲劳裂纹。首先在桥板和槽筋之间焊接连接处发现了 15 处疲劳裂纹，后来直到 1985 年发现了超过 160 处裂纹。全部裂纹位于第一车道下方，几乎所有的大型车辆在这里通过。

图 2 在塞汶河横越大桥发现的疲劳裂纹

## 塞汶河桥和怀桥的重新焊接维修

为了决定维修疲劳裂纹的方法，英国运输与道路研究所（Transport and Road Research Laboratory，简称 TRRL）开展了多项研究。研究表明，桥板和槽筋之间焊接连接处的疲劳强度随焊接厚度的提高而改善。因此，从上世纪 80 年代后期开始，对塞汶河桥进行重新焊接维修，保持足够的焊接厚度。

组装时对槽筋边缘切割，使其与桥板底面平行。在重新焊接过程中，对其再次切割（不是通常采用的开沟槽）使其垂直，进行部分穿透焊接获得足够的焊接厚度。为此我们开发了独特的切割设备（图 3）。该切割设备可沿纵向移动 1 米，切割器由两个独立的导向框架支撑，以跟随桥板和槽筋腹板的变形。经过 51 次现场试验，确定了 13 项焊接条件，根据

这些结果进行重新焊接维修，采用 3 条焊道保持 7.5mm 的焊接厚度（图 4）。对位于车轮下侧的焊接连接处重新焊接的总长度约为 20km。维修时对车道的交通加以限制，避免因关闭交通带来不便，因此维修期间为 18 个月。

图 3 独特的切割设备

图 4 原先及重新焊接后焊接连接处的宏观腐蚀试验

### 塞汶河桥和怀桥的现场调查

在塞汶河横越大桥的现场调查中，我们调查了箱梁重新焊接连接处的状况以及沥青路面的状况。我们注意到交通量非常少，其原因是大约 70% 的交通量转移到位于塞汶河桥下游的第二塞汶河桥，该桥于 1996 年建成通车。在车轮通过的位置，可看到 1991 年进行的许多沥青重新修补之处（照片 2）。在对箱梁内部进行现场调查时，我们调查了桥板和槽筋之间、槽筋和隔板之间、槽筋底部和浮运隔板之间焊接连接处的重新焊接维修状况（图 5）。

照片 2 塞汶河桥桥面的状况

图 5 塞汶河桥的疲劳裂纹维修

关于采用 3 条焊道重新焊接，桥板和槽筋之间的焊接尺寸差量越小，与原先相比其质量越好。对槽筋和隔板之间横截面的疲劳裂纹采用金属垫板进行焊接维修。维修槽筋和浮运隔板之间焊接连接处较大的疲劳裂纹时，切掉部分槽筋底部，然后附加金属搭桥材料。将发生疲劳问题的浮运隔板予以拆除。

在英国，对于诸如塞汶河桥的大跨度桥梁，每隔两年进行一般检查，每隔 6 年进行重要检查。对每次在一般检查中发现的疲劳裂纹或损伤进行维修。虽然因第二塞汶河桥通车使交通量减少，新发现的疲劳裂纹数量降低，但每年仍维修大约 50 个裂纹或

损伤。

### 厄斯金桥的概况

厄斯金桥架设在苏格兰格拉斯哥西部的克莱德河上，是一座单面索斜拉桥（照片 3）。桥长 1,321m，1971 年建成通车。这座大桥构成了通往苏格兰的主要通道，每天的车流量超过 4,000 辆。很明显，这座大桥不符合后来由梅理森报告（Merrison Report）提出的标准，从上世纪 70 年代至 80 年代以及于 2004 年，对该桥进行了加固和重新拉紧钢索作业（照片 4）。厄斯金桥采用了正交异性钢桥板系统，桥板厚 12.7mm，并采用厚 5mm 的 V 形肋骨作为纵向肋条。与塞汶河桥相同，桥面铺设厚 38mm 的沥青砂胶。

照片 3 厄斯金桥

照片 4 根据梅理森报告进行加固

### 厄斯金桥的现场调查

在厄斯金桥发现的主要 3 种类型疲劳裂纹如图 6 所示：（1）桥板和槽筋之间的焊接连接处，（2）槽筋和端部隔板之间的焊接连接处，（3）桥板和垂直加劲肋之间的焊接连接处。对厄斯金桥进行了超过 1,200 个裂纹或损伤的维修，并包括在非正交异性桥面发现的问题。在现场调查中，我们调查了这三种疲劳裂纹状况。

在焊缝上发生的裂纹例如照片 5 所示，我们称其为“焊缝贯穿裂纹”。在该桥上发现了大约 10 个焊缝贯穿裂纹，其中的一些裂纹与塞汶河桥同样采用切割槽筋端部然后以 3 条焊道重新焊接进行了维修。虽然照片 5 所示的疲劳裂纹长度超过 700mm，但裂纹没有像在日本发生的那样向槽筋的腹板延伸。其原因可能是由于英国和日本的焊接条件、桥板和槽筋之间焊接连接处的切割、尺寸或槽筋的密封性不同等。

图 6 在厄斯金桥调查的疲劳裂纹

照片 5 厄斯金桥的焊缝贯穿裂纹

## 总结

通过本次现场调查，我们了解了英国的正交异性桥面疲劳问题和对其维护所采取的对策。尤其是关于我们所调查的大跨度桥梁，长期以来民营公司参与了维护作业，我们了解到他们今后会对桥梁进行持续观察。相同的工程技术人员可有组织地进行一般监视、检查以及维修很有意义，我们在日本应参照他们的做法。



(8~11 页)

## 东海道新干线钢结构桥的维护与加固

JR 东海新干线铁道事业本部 锻冶 秀树

JR 东海中央新干线推进本部 高桥 和也

JR 东海综合技术本部 伊藤 裕一

东海道新干线中有总长约 22.1km 的钢结构桥，对其正式采用了在日本首创的全焊接结构。与混凝土桥梁相比，由于钢结构桥梁对于列车负荷的响应较大，列车的通过数量与通车时相比增加，因此焊接部位的疲劳及耐久性能成为重要课题。特别是主要构件上的纵向焊缝焊接处（以下简称纵向焊缝）的长度较长，检查时的着重点难以集中，一旦发生裂纹则延伸速度较快，所以防止纵向焊缝发生疲劳裂纹至关重要（图-1）。为此，本公司在小牧研究设施采用实际桥梁或实物尺寸模型进行疲劳荷载试验以及三维 FEM 解析，作为“预防性维护”，研究开发了桥板骨架连接部位加固、支点部位更换及加固以及插入枕木等新工艺，实施了大规模维修。本文介绍钢结构桥大规模维修的具体实施内容。

此外，我们将在实施这些防止劣化对策工艺的基础上，确认结构体的状态，个别判断作为总体维

修构件更换的施工时期。

图 1 纵向焊缝

## 钢结构桥的维护与加固

### ◆纵向焊缝的评估

我们知道，纵向焊缝的疲劳强度受到焊接内部缺陷的影响。在东海道新干线也同样，对实际桥梁采用超声波调查、以及对从东海道新干线拆除的实物钢结构桥进行分解调查的结果表明，无法否定存在一定程度的气孔。

在小牧研究设施，我们对新干线开业后使用了 35 年以上、随着 2003 年秋新设东海道新干线品川车站而拆除的钢结构桥进行疲劳试验，并使用有意造成气孔的大型钢梁试件实施疲劳试验（照片-1）。实物尺寸试件及构件试件的结果均表明（图-2），符合 JSSC 的疲劳设计规范等规定的“D 级”，关于在东海道新干线所有钢结构桥测定的发生应力值，即使考虑通常估测的列车轮重变动系数，也低于 D 级疲劳限度。然而若因其他损伤使结构系统发生变化导致应力增加，或因轨道及枕木等的维护状况等发生极端的冲击性轮重变动，存在发生应力超过纵向焊缝疲劳限度的可能性。

对此，我们开发了①桥板骨架（纵向梁、横向梁）连接处加固工艺、②支点部位更换及加固工艺，防止造成结构系统变化的不良，限制在纵向焊缝发生的应力增大（图-3）。

照片 1 疲劳试验的状况

图 2 纵向焊缝疲劳试验结果

图 3 限制变化对策的概要

### 桥板骨架连接处的加固

根据至目前为止的现场调查，发现在部分下承式桁架、下承式板梁的桥板骨架连接处发生了疲劳裂纹。以下承式桁架为例，通过 3 维 FEM 解析得知，

在纵向桁架承托周围的焊接处以及交叉部位狭缝周围焊接处发生裂纹，这种裂纹使纵向焊缝应力增大，可能诱发纵向焊缝发生裂纹。对此，我们提出了防止桥板骨架连接处发生裂纹的加固工艺方案。

#### ◆下承式桁架桥板骨架连接处的加固

该部分在细节方面存在问题，以前就发现了数种裂纹。我们首先进行应力测定，并分析疲劳裂纹的发生状况，针对疲劳讨论安全性。结果表明，在桥板骨架连接处存在发生疲劳裂纹的可能性，并且明确这些疲劳裂纹分为“纵向梁承托与垂直加固部件上端交叉部分的焊接处”以及“纵向梁承托与横向梁交叉部分狭缝内的环焊处”两种（图-4）。

然后，为了防止发生造成上述裂纹原因的变形，我们提出了加固方案（照片-2），采用设有加固构件的桥板骨架连接处实物尺寸试件进行静态荷载试验及疲劳试验，确认作为改善疲劳特性方法的有效性，最后将获得有效性确认的加固方法适用于实际桥梁的加固施工，测定加固前后的应力。结果表明，对于纵向梁承托与垂直加固部件上端交叉部分焊接处以及纵向梁承托与横向梁交叉部分狭缝内环焊处附近的应力，确认采用加固构件后可降低至该焊接处的疲劳限度以下。

#### ◆下承式板梁桥板骨架连接处的加固

有报告指出，在开框肋板式下承板梁的纵向梁与横向梁的焊接处（图-5）也发生了疲劳裂纹。

如图-6所示，在该部位发生了基本上为3种类型（①纵向梁上的边缘凹口处，②纵向梁下的边缘凹口处，③纵向梁梁腹铆钉孔）的疲劳裂纹。如果这些裂纹继续延伸，设有横向梁的纵向梁的连续性丧失，与桁架相同，纵向梁的纵向焊缝应力将增大。

对此，我们通过静态荷载试验讨论纵向梁与横向梁连接处的加固方法，决定了可最有效降低应力的加固结构。如照片-3所示，在桥板骨架连接处设置船形托架等，在图-6所示的3类裂纹发生位置取得了降低应力效果。

图4 桥板骨架连接处的疲劳裂纹（下承式桁架）

图5 开框肋板式下承板梁

图6 桥板骨架连接处的疲劳裂纹（下承板梁）

照片2 桥板骨架连接处采取对策前后的状况

照片3 船形加固对策（下承式板梁）

#### 桁架承托处的对策

对实际桥梁进行的应力测定结果表明，承托处或承座的功能降低可能显著增加纵向焊缝的应力。尤其对于桁架采用焊接底板架设的钢结构桥，应力在底板焊接处发生，存在疲劳损伤向主梁边缘及梁腹延伸的重大问题。

更换承座前后底板焊接处前面的应力测定位置如图-7所示，测定结果如图-8所示。在底板焊接处前面发生较大的应力，下缘发生扭曲。将更换前后的承座应力进行比较，测定结果表明，更换前应力较高，是更换后应力的大约10倍，因此需要维持承座的健全性。

图7 测定位置

图8 承座更换前后的应力比

#### 总结

迄今为止，裂纹发生后的延伸速度较快，对难以采取检查措施的纵向焊缝的疲劳裂纹，需要在不久的将来更换构件。然而此前的研究结果认为，加固桥板骨架连接处防止桥板骨架连接处发生变形，实施桁架承托处的对策，可延长钢结构桥的寿命和强化耐力。此外关于特大轮重，由于在无道床桥梁也发生，因此防止措施非常重要。作为对策，根据从根本上变更轨道结构的考虑，向现有枕木之间新插入枕木形成板支撑结构，可限制轮重变动。有关该内容将另行说明。今后，我们将采用这些对策工艺，致力于实现东海道新干线钢结构桥的长寿命化，提高耐力。关于构件更换的必要性，我们将继续监视其效果，予以进一步讨论。



(12~15 页)

## 首都高速公路的维护管理

首都高速公路株式会社 冈田 昌澄  
首都高速公路株式会社 溝口 孝夫  
首都高速公路技术中心 相川 智彦

首都高速公路是为了缓解日本的首都东京及近郊地区长期性交通拥挤而建设的汽车专用公路。在东京奥运会开幕的 1964 年，大约 33km 高速公路投入使用，随着日本经济的成长，高速公路建设不断推进，在约 50 年后的 2010 年，首都高速公路已达到 301.3km。2010 年（财会年度），首都高速公路创造了日本首屈一指的交通量（12 小时 11.5 万辆，每小时 1.1 万辆）。现将这条收费高速公路的维护管理概要介绍如下。

### 特点

从 1958 年开始，首都高速公路的建设和维护管理由首都高速公路公团负责，后来因行政改革，从 2005 年开始由首都高速公路株式会社负责。

在总长 301km 的首都高速公路中，分为从构成网络的区间向一个方向的 2 车道（双向 4 车道）或者向一个方向的 3 车道（双向 6 车道）两种类型。

为了建造首都高速公路，我们最大限度地利用原有河流、运河以及道路等公共用地的上方空间。因此首都高速公路在结构上，平面道路占 5%，桥梁及隧道等结构体占 95%。此外，桥梁的比例占总长度的 80%。具体为桥梁合计约 11,800 跨（钢梁 RC 桥板 7,770 跨，钢梁钢结构桥板 1,340 跨，PC·RC 梁 2,690 跨），桥墩合计 8,680 座（钢结构 2,885 座，RC 结构 5,795 座）。

目前，每天约有 180 万人次利用首都高速公路。

每天的总交通量约 100 万辆，其中大型车辆约 10 万辆。在这里，交通量为从构成网络的区间向一个方向每天 8 万辆（3 车道）至 1500 辆（2 车道），具有一定的范围。

为了安全实施高速公路的检查和维修加固施工，需要临时减少车道保证作业场地。由于这个缘故，为了尽可能避免交通拥挤，对于交通繁重的区间避免白天作业，在交通量较少的夜间实施。

2012 年度（财会年度），用于首都高速公路维护管理及运营的费用为 610 亿日元。其中用于结构体的检查及维修加固费用为 420 亿日元，作为运营收费高速公路的必要费用为 190 亿日元。

### 检查、维修系统

为了持续实施首都高速公路的维护管理，如图—1 所示，我们实施（检查）计划→检查→判定→应对（维修、加固）→（检查）计划的系统性作业。

关于检查，按照目的和频度分为日常检查（巡检、徒步检查）、定期检查（接近检查、使用设备检查等）以及临时检查（发生地震时等）。

—日常检查是掌握结构体有无损伤、道路上有无掉落物体等的检查。有原则上每 2 小时进行一次的巡检测到 5 年一次的伸缩装置等的徒步检查，在检查频度上各不相同。

—定期检查是为了详细了解结构体等的损伤状况而接近结构体、原则上 5 年进行一次的检查，是最基本且重要的检查。

—临时检查是在发生大地震以及暴风雨后掌握结构体有无损伤以及损伤程度的检查。

关于维修部位，根据检查结果的损伤等级判定，运用数据库（维护信息管理系统）决定。完成维修后，向数据库输入维修记录，作为数据保存，用于制订下次检查和维修计划方案。

构成日常检查的巡检如照片—1 所示，徒步检查如照片—2 所示，构成定期检查的接近检查如照片—3 所示，使用设备检查如照片—4 所示。



## 图 1 检查、维修系统

照片 1 巡检（巡检车在高速公路上行驶，确认结构体的变化）

照片 2 徒步检查（对高速公路进行夜间交通管制，由检查员步行检查结构体）

照片 3 接近检查（使用高空作业车进行检查，在不影响道路交通的地点可进行白天作业）

照片 4 使用设备检查（对结构体的焊接部位进行超声波探伤检查）

## 维修、加固例

对路面的车辙和裂纹进行路面重新铺设，对钢结构体的生锈进行重新涂装，除此之外，钢结构体的疲劳现象成为维修和加固的课题。以下介绍疲劳损伤的事例。

### ◆钢结构桥墩拐角部位发生的疲劳裂纹

1997 年，我们在钢结构桥墩的拐角部位发现了裂纹。根据详细调查，该裂纹是延伸性疲劳损伤。此外，我们采用实物尺寸的试件进行疲劳试验，推测疲劳损伤的发生原因。通过进一步讨论，为了缓和裂纹发生位置周边的应力集中，对原有桥墩采用了使用高强度螺栓连接钢板的工艺。

疲劳裂纹的发生位置如图-2、照片-5 所示，采用钢板的加固方法如照片-6 所示。

## 图 2 钢结构桥墩拐角部位的疲劳裂纹发生位置

照片 5 疲劳裂纹的发生状况（在柱与梁交叉的焊接线上发现）

照片 6 对钢结构桥墩附加钢板进行加固。

### ◆钢结构桥板发生的疲劳裂纹

在钢结构桥板上也发现了不少疲劳裂纹。其中关于在钢结构桥板与槽筋之间的焊接连接处发生的疲劳裂纹，也确认了发生向桥板板厚方向延伸贯通的情况。

对于这种现象，我们将沥青路面更换成浇筑弹性系数较大的 SFRC（钢纤维增强混凝土），通过其刚性抑制在钢结构桥板与槽筋之间的焊接连接处发生的变形。

为了确认这种加固的效果，需要决定必要的材料和结构，因此我们实施疲劳试验，改换原有 8cm 厚的沥青路面，浇筑厚 5cm 的 SFRC（钢纤维增强混凝土），在其上铺设厚 3cm 的沥青路面。

采用这种工艺时的铺设结构及 SFRC 的浇筑状况如照片-7 所示。

照片 7 钢结构桥板的疲劳对策（SFRC 加固）施工状况（蓝色为环氧树脂）

### ◆RC 桥板的疲劳对策

关于 RC 桥板的加固，为了缓和在 RC 桥板发生的动荷载造成的弯矩，通常采用在主梁之间增设 1 根至 2 根纵梁的工艺，或者采用连接钢板与原有的 RC 桥板成为一体承受发生弯矩的工艺。然而由于这些工艺使用钢材，因此需要坚固的临时脚手架，对安装构件的操作也需要予以特别注意。

后来我们明确，RC 桥板的损伤进展也是由于通行车辆导致发生的疲劳现象，从而确立了采用新材料的加固工艺。

我们采用在桥板的背面粘接碳纤维板的工艺。粘接碳纤维板、完成涂装后的照片和施工状况的照片如图-8 所示。

图 8 对 RC 桥板采用碳纤维板加固（对桥板直接粘贴碳纤维板。为了防止环氧树脂劣化进行涂装。）

## 有关大规模更新的讨论

长期以来，我们对结构体进行检查，根据检查结果实施维修。然而首都高速公路的总长达 301km，通车后已使用 40 多年的结构体约占 30%（总长度：100km）。因此，多年来保证大量车辆通行的结构体

也发生很多损伤，并且发现了重大损伤。

在总长 301km 中，对于发现重大损伤而需要更新的结构体，制订了实施约 8km 的桥梁重建或更换桥板的计划；对于需要进行大规模维修的约 55km，制定了对结构体总体实施维修的计划。此外，这些工程的概算费用分别为 3,800 亿日元及 2,500 亿日元，合计为 6,300 亿日元。

首都高速公路株式会社以实现安全和舒适的交通为目标，向用户提供满意的优质服务。今后，我们仍将本着上述方针，继续开展维护管理业务。

### 关于首都高速公路株式会社

有关首都高速公路的维护管理及其他业务的信息，可浏览以下网页获取。

一首都高速公路株式会社概要

<http://www.shutoko.co.jp/english/>

一首都高速公路株式会社的维护管理

<http://www.shutoko.co.jp/english/technology/mm-maintenance/>



(16~18 页)

## 从 RC 桥板向钢桥板的更换：美川大桥

Eight-Japan 技术开发株式会社

美藤友郎

美川大桥坐落在主要地方道路金泽小松线横跨手取川的地点，是桥长 398m 的钢跨（2+3+2）连续非合成板梁桥。由于交通量的增加和环境中盐分的影响，RC 桥板不断劣化，同时鉴于需要在上游侧设置人行道（扩宽）以及应对 B 动荷载等问题，我们采用钢桥板更换了 RC 桥板。以下介绍本设计的概要。（请参照图 1）

图 1 美川大桥断面图（更换桥板的前后）

### 桥梁的概要及经过

美川大桥位于石川县白山市美川南町，是架设在距离一级河流手取川河口约 200m 地点的桥梁。桥长 398m（跨距为 51.0+58.6、58.6+59.0+58.6、58.6+51.0m），上部结构为 2 座钢结构 2 跨连续非合成板梁桥、1 座钢结构 3 跨连续非合成板梁桥，下部结构为 RC 壁式桥墩，基础结构为开口沉箱基础。（图 2）

在美川大桥的上游侧，有于 1938 年架设的美川桥，直到美川大桥通车的 1972 年为止，美川桥作为公路桥使用，美川大桥竣工后作为自行车和人行道使用。（照片 1）

然而从河流阻碍率的观点考虑，提出及早拆除美川桥的要求，在美川大桥上游侧以哪种形态设置用于替代的人行道是长期以来的课题。此外，虽然在 1997 年至 1998 年对美川大桥实施了主梁的 B 动荷载加固，但在另一方面，混凝土桥板发生劣化（钢筋腐蚀、被覆混凝土剥落），需要解决人行道扩宽（增设）、桥板的 B 动荷载加固以及轻量化（抗震加固）等各种问题。

图 2 美川大桥的桥梁总图

照片 1 美川大桥和美川桥

### 为了长期使用美川大桥的课题和着眼点

美川大桥存在的课题如以下（1）~（3）所示。

#### ◆RC 桥板发生劣化

关于 RC 桥板，在以往进行的调查（1996 年）中发现了许多裂纹以及被覆混凝土剥离，在后来的桥梁检查中发现劣化进一步发展。2006 年进行的氯根离子含量调查结果表明，钢筋位置的氯根离子量不久将达到生锈限界的程度，设想今后因盐害导致的钢筋腐蚀会发生急速劣化。（照片 2）

照片 2 RC 桥板钢筋的暴露状况 (2006 年拍摄)

◆在上游侧设置人行道的必要性

如上所述,从阻碍河流横截面积的观点考虑,决定及早拆除上游侧的美川桥(人行道桥)。另一方面,从安全性和便利性的观点出发,当地的白山市提出了拆除美川桥后在美川大桥的上游侧也设置人行道的要求。

◆考虑到抗震加固实现轻量化

另外进行的讨论结果表明,如果保持现状 RC 桥板不变而为了上游侧人行道进行扩宽,上部结构的重量增加,桥墩的抗震加固难以实现。因此,为了提高桥梁总体的抗震性能,轻量化成为一项条件。

关于解决上述 3 个课题的方法,包括宽度构成在内进行讨论,从结构性、施工性以及原有桥墩影响的观点考虑,作为更换桥板的讨论结果,由于可兼顾宽度增加和减少静荷载,并可配合已实施的 B 动荷载加固,同时对抗震加固保留现实性加固量,可实现轻量化,因此采用了更换成钢桥板的方案。

保证现有道路交通的更换计划

将 RC 桥板更换成钢桥板时,关于最佳宽度构成,我们从以下两方面进行讨论。

◆着眼于完成时的主梁应力度讨论宽度

关于完成时的宽度构成,从主梁应力度观点考虑,我们对 B=12.6m、13.6m、14.6m、15.6m 的 4 种方案进行试算。讨论结果表明,为了使已实施 B 动荷载加固的主梁应力度在允许值范围内,总宽度需要保持在 13.6m 以下。

◆着眼于施工讨论宽度(图-3)

关于桥板的更换,由于早晚交通量较多,在桥的端部设有交叉点,因此担心发生交通拥挤,所以将施工时保证 2 条车道(单向 1 条车道)作为前提条件。保证施工时 2 条车道的最低宽度为  $0.4+6.0 \times 2+0.3 \times 2+0.2+0.4=13.6\text{m}$ 。

根据上述两方面的讨论结果,我们采用了 13.6m

的最佳宽度。

图 3 着眼于施工讨论宽度

更换桥板的设计方针

◆主梁的应力核对

虽然美川大桥属于非合成梁结构,但在更换成为钢桥板时,考虑钢桥板纵梁与主梁的合成效果,按照以下考虑进行应力核对。

- ①对于架设钢桥板之前的静荷载,仅由原有主梁断面承受。
- ②对于架设后的静荷载和动荷载,由包括钢桥板的合成断面承受。
- ③在每一步增加①、②的应力度进行应力度核对。
- ④关于原有主梁断面,由于因腐蚀发生了主梁板厚减少,所以在断面计算时根据调查结果,减少腹板及下缘板厚进行计算。此外,对已完成原有梁的覆板加固部分予以考虑。

图 4 合成梁的断面

◆步骤计算

如在(1)中所述,由于考虑钢桥板与原有主梁的合成效果进行主梁应力核对,以及考虑交通管制而采用阶段性施工,因此各施工阶段的结构系统不同。为此考虑如图-5 所示的施工步骤,对各施工阶段的应力状况实施核对,关于施工时的安全性、完成时的主梁应力度、支撑反作用力以及防止桥梁塌落的设计荷载等,经核对没有超过允许值和设计荷载。

施工步骤的概要如下所示。

图 5 施工步骤图

施工时对原有桥板的加固

关于在保证 2 条车道通行的条件下更换桥板,

对于在施工中途阶段的原有桥板，由于中央的中间桥板成为突出桥板，并且作为人行道设计的桥板厚度较薄（16cm），向下游侧突出的桥板部分承受车轮荷载的作用，因此采用临时纵向梁及托架进行加固（图—6、照片3）。

图6 下游侧桥板加固图  
照片3 桥板加固托架

## 结语

本桥的钢桥面更换施工于2010年度动工，并于2014年春竣工。

拆除发生劣化导致承载力降低的原有RC桥板更换成为钢桥板，实现桥梁的长寿命化，并实现总体轻量化，可提高抗震性能。此外，由于在上游侧附加了人行道，可拆除美川桥而不会影响原有的方便性。

另外，施工时也没有设置临时桥梁，将对交通的影响降低到最小程度，同时实现了缩短工期和降低总体成本。（照片4）

如果本文能够对今后越来越多的桥板更换计划起到参考作用，我们将非常欣慰。

照片4 更换桥板后的美川大桥



（封底）

## 日本钢铁联盟的活动

### 计划在柬埔寨举行有关钢结构的第二届会议

日本钢铁联盟（JISF）计划于今年12月在柬埔寨的金边举行以“Recent Technologies for Steel Structures 2014（钢结构的最新技术2014）”为主题的会议。本届会议将由JISF、柬埔寨公共事业运输

部（Ministry of Public Works and Transport，简称MPWT）以及柬埔寨工业大学（Institute of Technology of Cambodia，简称ITC）联合主办。今年6月初，JISF与两个合作方在金边召开了准备会议。

本届会议由数个会议部分构成，在以一般工程技术人员为对象的会议部分，将由日本和柬埔寨两国专家发表5项港湾和桥梁以及大厦的钢结构技术演讲。在接下来由两国重要人物出席的会议部分，将开展有关钢结构在柬埔寨推广普及的讨论。

2012年12月，JISF曾在金边与MPWT和ITC共同主办了有关钢结构的第一届会议。

### 请对读者问卷调查提供协助

本刊《Steel Construction Today & Tomorrow》由日本钢铁联盟与日本钢结构协会联合编著，每年出版3期，是唯一定期发行的英文期刊，主要以亚洲各国的建筑相关人员为对象，介绍与日本的钢结构相关的技术信息。为了准确了解读者的需求，进一步发挥本刊的作用，我们将在发行2014年度的3期期刊时进行读者问卷调查。问卷调查表格可通过以下方法获得。

#### \* 日本钢铁联盟的网站

问卷调查表格登载在日本钢铁联盟的网站上，可直接填写回答。您可通过以下方法方便地浏览。

1. 通过检索网站输入“JISF”搜索。
2. 在日本钢铁联盟的英语网站上点击横幅广告。
3. 点击 Questionnaire。

#### \* 通过传真回答

对于定期订户，我们将随本刊送上问卷调查表格，请在表格中填写回答。

通过问卷调查将进一步发挥本刊的作用，从而对日本的钢铁行业与贵国的相互发展做出贡献。我们期待着您的积极回答。