

STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(第 42 期，2014 年 8 月)
日本鋼鐵聯盟與日本鋼結構協會會刊

中文版

STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

是每年出版 3 期的英文版刊物，面向全球各相關企業與部門發行。本刊物的目的是介紹建築、土木工程領域的鋼結構相關規格、規範以及先進的專案實例、最新施工技術及材料等。

為了更便於臺灣與香港的讀者理解這些內容，我們以文章部分為中心編輯了中文版，與英文版一併提供。有關文中的圖表與照片，我們僅翻譯、刊載了標題。有關具體內容，請參照英文版。另外，也請參照英文版確認技術性說明和具體內容。

第 42 期 (2014 年 8 月) : 目錄

土木結構體的設計標準 — 性能設計和可靠性設計 規範以及今後的方向-----	1
英國的鋼橋板疲勞損傷及維修事例調查報告-----	4
東海道新幹線鋼結構橋的維護與加固-----	8
首都高速公路的維護管理-----	12
從RC橋板向鋼橋板的更換：美川大橋-----	16
日本鋼鐵聯盟的活動-----	封底

注：頁數為英文版第 42 期的頁數

中文版：©一般社團法人日本鋼鐵聯盟 2014

郵遞區號 103-0025

東京都中央區日本橋茅場町 3-2-10

一般社團法人 日本鋼鐵聯盟

傳真：81-3-3667-0245

電話：81-3-3669-4815

電郵地址：sunpou@jisf.or.jp

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

(1~3 頁)

土木結構體的設計標準 — 性能設計和 可靠性設計規範以及今後的方向 —

岐阜大學 工學部 教授
本城勇介

本文的目的是簡要介紹有關日本土木結構體設計標準在最近 15 年期間的發展動向，並闡述今後的展望。本文中的關鍵字是“性能設計”和“可靠性設計規範”。關於“性能設計”，根據 JGS4001-2004 的辭彙定義，“性能設計 (Performance Based Design)：對於結構體，不是根據其規格、而是根據其社會性要求的性能進行規定和設計的設計構想”。

採用可靠性設計規範和性能設計的過程

◆根據可靠性設計規範採用設計標準

可靠性設計規範、即限界狀態設計規範向設計標準的採用可追溯到上世紀 70 年代。當時在歐洲開始推進制訂全歐洲統一的建築物以及社會基礎設施的設計標準，這就是目前的 Structural Eurocodes (歐洲結構規範)。出於“好馬配好鞍”的考慮，將根據在該時期已基本呈現集大成的可靠性設計規範的審核規範採用於該標準。眾所周知，經過近 40 年的準備期間，終於在 2010 年完成並施行。

另一方面在北美也同樣，1983 年制訂的安大略公路橋樑設計規範 (Ontario Highway Bridge Design Code, 簡稱 OHBDC) 是基於正式的可靠性設計規範的設計標準，在其影響下，作為北美土木相關設計標準中最權威的 AASHTO 橋樑設計規範 (Bridge Design Specifications, 簡稱 BDS) 也從上世紀 80 年代後期開始推進作業，1995 年發行了 LRFD 版的 AASHTO BDS。此後直到目前進行了不斷修改。

與以上歐洲及北美的發展相比，日本根據可靠性設計規範制訂部分係數型審核規範的設計標準大

幅滯後。明確根據該方針作為土木結構體的設計標準首次制訂的是 2007 年的《港灣設施的技術相關標準》。雖然對日本的土木結構體設計具有最強影響力的道路橋示方書在當時沒有採用部分係數規範，但是目前正在全力推進修改作業，不久將會修改成為大幅採用基於負荷及強度係數設計規範 (LRFD) 的審核公式的內容。

與北美及歐洲相比，雖然日本將可靠性設計規範向設計標準的採用滯後，但是該採用具有與其他各國不同的顯著特點。也就是這些設計標準重視被稱為性能設計的框架，在此基礎上，將可靠性設計規範規定為審核方法採用。我們在下節說明性能設計採用的過程。

◆性能設計採用的過程

縱觀全球，性能設計至少存在兩種源流 (圖 1)。一種起源於 Nordic 5 Level System。為了對建築標準進行國際性調查，出於將性能要求實現階層化、劃分為強制規定部分和非強制性的參照部分的考慮，是與 WTO/TBT 協定的“不是根據規格的規定、而是根據性能的規定”內容均密切相關的方針。另一種是以美國加州結構工程師協會 (SEAOC, 1995) 的 Vision 2000 性能要求矩陣 (圖-2) 提案為起源的方針。該提案吸取北嶺和洛瑪—普雷塔兩次地震受災的教訓，作為建築物業主與結構技術人員進行結構體抗震性能的溝通手段提出。

目前在日本發生的、以基於性能設計概念採用可靠性設計規範進行結構體審核為基礎制訂設計標準的起源可歸結為於 1995 年生效的 WTO/TBT 協定。日本政府以此為契機，實施大幅度限制鬆綁政策。其中的一環是通過政策推進各項工業標準的國際整合化、性能規定化以及排除重複檢查等的結果。

與其對應，學會也在早期開展了掌握根據 WTO/TBT 協定向設計標準採用性能設計概念動向的工作。例如，地盤工學會於 2004 年制訂的《地盤規範 21》以及土木學會於 2003 年發行的“規範 PLATFORM”等，對後來的各種設計標準的修改產

生了影響。

性能設計與可靠性設計規範的定位如圖 3 所示，並在概念上說明了與 WTO/TBT 協定以及 ISO 標準的關係。性能設計是根據國際性通商政策方面共識的框架，作為今後的設計規範，將根據性能規定提出結構體的性能要求，對於該審核採用由 ISO2394 等國際標準規定的可靠性設計規範進行。

圖 1 可靠性設計的兩種源流

圖 2 SEAOC VISION 2000 的性能要求矩陣

圖 3 WTO/TBT 協定、性能設計以及可靠性設計規範

日本土木結構體設計標準的現狀

如上所述，《港灣設施的技術相關標準》是於 2007 年根據可靠性設計規範以採用部分係數進行審核為基本修改的標準。關於該修改的概要，例如 Nagao 等（2009）已通過英文進行了介紹，在此省略。

以下我們以在日本土木結構體市場中規模最大的道路結構體的標準《道路橋示方書》的最近修改為基礎，介紹通過修改提出對該標準的構想。

關於修改方案提出的道路橋性能規定的構想如圖-4 所示。該圖表示了關於橋樑承載性能的性能規定概念，對於橋樑的性能要求，以橋樑的狀態（按限界狀態表述性能）和在設計中考慮的狀況（考慮承載的狀況、永續、變動以及偶發支配）為兩個要點，通過性能矩陣表示。此外，將在設計的使用期間（通常為 100 年）的任意時刻按照一定的概率滿足作為性能要求。這裏的“一定的概率”意味著可靠性，可理解為該規定基於可靠性設計的理念。

圖-4 的下側表示根據部分係數的審核概念，關於在性能矩陣中指定的承載狀況與橋樑的限界狀態的組合，採用部分係數的審核公式進行審核。這時採用的方法以負荷阻力係數方法為基本。

目前的修改作業正在根據如圖-4 所示的概念

推進。在作業中對於各個構件，採用可按照性能矩陣定義的性能要求進行審核的方式開展具體作業。這裏包含了許多工程性判斷。因此，該修改強調了“認為”的概念。對於一個指定的審核規範，可審核是否滿足規定的性能要求是“認為”的含意。同時，“認為”的含意並不表示指定的審核規範是唯一的審核規範，對於其他設計人員認為適當的審核規範也留有餘地，這一點同樣很重要。

圖 4 道路示方書修改方案提出的道路橋性能規定化的構想

今後的展望

以性能設計為基本，對審核採用基於可靠性設計規範的部分係數方法和負荷阻力係數方法進行，這就是目前的日本主要土木結構體的設計標準動向。這種“以性能設計為基本”的構想是不同於 Eurocodes 以及 AASHTO SSHB 的日本獨自的方針。

如上所述，這種方針是在當初隨著 WTO/TBT 協定生效由日本政府作為限制鬆綁政策的一環而採用並發展的。但是就目前的道路橋示方書等的修改作業而言，可以看出這個框架向新的方向發展。

與美國等許多發達國家同樣，日本擁有巨大的社會基礎設施資源。從上世紀 60 年代開始加速建設、在 70 年代至 80 年代的經濟成長期大量建設的社會基礎設施的維護管理問題被廣泛認為將成為今後的重大問題。

在這種形勢下，我們認為以國土交通省為首的日本政府負責該領域的部門預測對於這些陳舊化的社會基礎設施難以都按照相同標準進行均等的維護管理。性能設計的概念蘊含著在社會的共識下實現結構體性能差別化的潛在能力，這是在考慮今後性能設計的發展時不可忽視的視點。



(4~7 頁)

英國的鋼橋板疲勞損傷及維修事例調查報告

道路技術研究中心 平山 繁幸

橫川橋樑株式會社 井口 進

三井造船株式會社 內田 大介

JFE 工程技術株式會社 川畑 篤敬

在日本，我們發現在正交異性鋼橋的橋板與槽筋之間的焊接連接處周圍發生疲勞裂紋，從焊根開始向焊縫擴展。最近，這些被稱作焊縫貫穿裂紋的損傷發生在交通狀況嚴苛的橋樑。有時，該損傷向槽筋或鋼橋板擴展，損害橋樑的性能。

1993 年，在阪神高速公路首次報告發現焊縫貫穿裂紋。隨著橋樑檢查精度和技術的提高，焊縫貫穿裂紋的數量增加。許多機構對其開展了試驗性或分析性研究。另一方面，上世紀 70 年代，世界上首次報告在法國的裏什蒙橋發現焊縫貫穿裂紋。此外，英國著名的塞汶河橋在相同期間發生了焊縫貫穿裂紋，並採用重新焊接的方法維修。我們還研究了焊縫貫穿裂紋的發生機理和維修方法。此後，關於正交異性鋼橋的疲勞裂紋，我們於 2011 年 4 月開展了為期 10 天的現場視察，包括英國的塞汶河橋。我們對塞汶河橋和厄斯金橋進行了現場調查。本文介紹英國的正交異性鋼橋疲勞問題的現場調查結果。

塞汶河橋和懷橋的概況

塞汶河橋位於英國的西南地區，是一座橫跨塞汶河的懸索橋。塞汶河橋與懷橋、歐斯特高架橋以及比齊利高架橋構成塞汶河橫越大橋，跨越英格蘭和威爾士的分界線。塞汶河橋於 1966 年建成通車。橋長 1,600m，主跨長 988m（照片 1）。根據風洞實驗結果，該橋採用流線型截面的箱梁作為加勁主樑。主樑兩側設有行人道和自行車道，同時也是維

護車輛用車道（圖 1）。橋板厚 11.5mm，採用(B) 305 mm ×(t)6 mm×(H) 230 mm 的槽筋結構。每隔 4,600mm 設內隔板，槽筋與內隔板焊接。橋板的現場連接採用各縱向和橫向的焊接連接。橋面鋪設厚 35mm 的瀝青砂膠。懷橋是單面索斜拉橋，設有兩座橋塔，其結構尺寸與塞汶河橋相同。

照片 1 塞汶河橋

圖 1 塞汶河橋的截面

在塞汶河橋落成 11 年後，1977 年在正交異性鋼橋板發現了疲勞裂紋。這些裂紋可按其位置分為 3 類：(1) 橋板和槽筋之間的焊接連接處，(2) 槽筋和橫樑之間的截面，(3) 槽筋底部和浮運隔板之間的焊接連接處（圖 2）。在塞汶河上浮運時，浮運隔板與箱梁構件的各端部連接，防止水漏入。由於完工後沒有拆除，因此在槽筋的底部和浮運隔板之間的焊接連接處周圍產生了疲勞裂紋。首先在橋板和槽筋之間焊接連接處發現了 15 處疲勞裂紋，後來直到 1985 年發現了超過 160 處裂紋。全部裂紋位於第一車道下方，幾乎所有的大型車輛在這裏通過。

圖 2 在塞汶河橫越大橋發現的疲勞裂紋

塞汶河橋和懷橋的重新焊接維修

為了決定維修疲勞裂紋的方法，英國運輸與道路研究所（Transport and Road Research Laboratory，簡稱 TRRL）開展了多項研究。研究表明，橋板和槽筋之間焊接連接處的疲勞強度隨焊接厚度的提高而改善。因此，從上世紀 80 年代後期開始，對塞汶河橋進行重新焊接維修，保持足夠的焊接厚度。

組裝時對槽筋邊緣切割，使其與橋板底面平行。在重新焊接過程中，對其再次切割（不是通常採用的開溝槽）使其垂直，進行部分穿透焊接獲得足夠的焊接厚度。為此我們開發了獨特的切割設備（圖 3）。該切割設備可沿縱向移動 1 米，切割器由

兩個獨立的導向框架支撐，以跟隨橋板和槽筋腹板的變形。經過 51 次現場試驗，確定了 13 項焊接條件，根據這些結果進行重新焊接維修，採用 3 條焊道保持 7.5mm 的焊接厚度（圖 4）。對位於車輪下側的焊接連接處重新焊接的總長度約為 20km。維修時對車道的交通加以限制，避免因關閉交通帶來不便，因此維修期間為 18 個月。

圖 3 獨特的切割設備

圖 4 原先及重新焊接後焊接連接處的宏觀腐蝕試驗

塞汶河橋和懷橋的現場調查

在塞汶河橫越大橋的現場調查中，我們調查了箱梁重新焊接連接處的狀況以及瀝青路面的狀況。我們注意到交通量非常少，其原因是大約 70% 的交通量轉移到位於塞汶河橋下游的第二塞汶河橋，該橋於 1996 年建成通車。在車輪通過的位置，可看到 1991 年進行的許多瀝青重新修補之處（照片 2）。在對箱梁內部進行現場調查時，我們調查了橋板和槽筋之間、槽筋和隔板之間、槽筋底部和浮運隔板之間焊接連接處的重新焊接維修狀況（圖 5）。

照片 2 塞汶河橋橋面的狀況

圖 5 塞汶河橋的疲勞裂紋維修

關於採用 3 條焊道重新焊接，橋板和槽筋之間的焊接尺寸差量越小，與原先相比其品質越好。對槽筋和隔板之間橫截面的疲勞裂紋採用金屬墊板進行焊接維修。維修槽筋和浮運隔板之間焊接連接處較大的疲勞裂紋時，切掉部分槽筋底部，然後附加金屬搭橋材料。將發生疲勞問題的浮運隔板予以拆除。

在英國，對於諸如塞汶河橋的大跨度橋樑，每隔兩年進行一般檢查，每隔 6 年進行重要檢查。對每次在一般檢查中發現的疲勞裂紋或損傷進行維

修。雖然因第二塞汶河橋通車使交通量減少，新發現的疲勞裂紋數量降低，但每年仍維修大約 50 個裂紋或損傷。

厄斯金橋的概況

厄斯金橋架設在蘇格蘭格拉斯哥西部的克萊德河上，是一座單面索斜拉橋（照片 3）。橋長 1,321m，1971 年建成通車。這座大橋構成了通往蘇格蘭的主要通道，每天的车流量超過 4,000 輛。很明顯，這座大橋不符合後來由梅理森報告（Merrison Report）提出的標準，從上世紀 70 年代至 80 年代以及於 2004 年，對該橋進行了加固和重新拉緊鋼索作業（照片 4）。厄斯金橋採用了正交異性鋼橋板系統，橋板厚 12.7mm，並採用厚 5mm 的 V 形肋骨作為縱向肋條。與塞汶河橋相同，橋面鋪設厚 38mm 的瀝青砂膠。

照片 3 厄斯金橋

照片 4 根據梅理森報告進行加固

厄斯金橋的現場調查

在厄斯金橋發現的主要 3 種類型疲勞裂紋如圖 6 所示：（1）橋板和槽筋之間的焊接連接處，（2）槽筋和端部隔板之間的焊接連接處，（3）橋板和垂直加勁肋之間的焊接連接處。對厄斯金橋進行了超過 1,200 個裂紋或損傷的維修，並包括在非正交異性橋面發現的問題。在現場調查中，我們調查了這三種疲勞裂紋狀況。

在焊縫上發生的裂紋例如照片 5 所示，我們稱其為“焊縫貫穿裂紋”。在該橋上發現了大約 10 個焊縫貫穿裂紋，其中的一些裂紋與塞汶河橋同樣採用切割槽筋端部然後以 3 條焊道重新焊接進行了維修。雖然照片 5 所示的疲勞裂紋長度超過 700mm，但裂紋沒有像在日本發生的那樣向槽筋的腹板延伸。其原因可能是由於英國和日本的焊接條件、橋板和槽筋之間焊接連接處的切割、尺寸或槽筋的密封性不同等。

圖 6 在厄斯金橋調查的疲勞裂紋
照片 5 厄斯金橋的焊縫貫穿裂紋

總結

通過本次現場調查，我們瞭解了英國的正交異性橋面疲勞問題和對其維護所採取的對策。尤其是關於我們所調查的大跨度橋樑，長期以來民營公司參與了維護作業，我們瞭解到他們今後會對橋樑進行持續觀察。相同的工程技術人員可有組織地進行一般監視、檢查以及維修很有意義，我們在日本應參照他們的做法。



(8~11 頁)

東海道新幹線鋼結構橋的維護與加固

JR 東海新幹線鐵道事業本部 鍛冶 秀樹

JR 東海中央新幹線推進本部 高橋 和也

JR 東海綜合技術本部 伊藤 裕一

東海道新幹線中有總長約 22.1km 的鋼結構橋，對其正式採用了在日本首創的全焊接結構。與混凝土橋樑相比，由於鋼結構橋樑對於列車負荷的回應較大，列車的通過數量與通車時相比增加，因此焊接部位的疲勞及耐久性能成為重要課題。特別是主要構件上的縱向焊縫焊接處（以下簡稱縱向焊縫）的長度較長，檢查時的著重點難以集中，一旦發生裂紋則延伸速度較快，所以防止縱向焊縫發生疲勞裂紋至關重要（圖-1）。為此，本公司在小牧研究設施採用實際橋樑或實物尺寸模型進行疲勞荷載試驗以及三維 FEM 解析，作為“預防性維護”，研究開發了橋板骨架連接部位加固、支點部位更換及加固以及插入枕木等新工藝，實施了大規模維修。本文介紹鋼結構橋大規模維修的具體實施內容。

此外，我們將在實施這些防止劣化對策工藝的基礎上，確認結構體的狀態，個別判斷作為總體維修構件更換的施工時期。

圖 1 縱向焊縫

鋼結構橋的維護與加固

◆縱向焊縫的評估

我們知道，縱向焊縫的疲勞強度受到焊接內部缺陷的影響。在東海道新幹線也同樣，對實際橋樑採用超聲波調查、以及對從東海道新幹線拆除的實物鋼結構橋進行分解調查的結果表明，無法否定存在一定程度的氣孔。

在小牧研究設施，我們對新幹線開業後使用了 35 年以上、隨著 2003 年秋新設東海道新幹線品川車站而拆除的鋼結構橋進行疲勞試驗，並使用有意造成氣孔的大型鋼樑試件實施疲勞試驗（照片-1）。實物尺寸試件及構件試件的結果均表明（圖-2），符合 JSSC 的疲勞設計規範等規定的“D 級”，關於在東海道新幹線所有鋼結構橋測定的發生應力值，即使考慮通常估測的列車輪重變動係數，也低於 D 級疲勞限度。然而若因其他損傷使結構系統發生變化導致應力增加，或因軌道及枕木等的維護狀況等發生極端的衝擊性輪重變動，存在發生應力超過縱向焊縫疲勞限度的可能性。

對此，我們開發了①橋板骨架（縱向梁、橫向梁）連接處加固工藝、②支點部位更換及加固工藝，防止造成結構系統變化的不良，限制在縱向焊縫發生的應力增大（圖-3）。

照片 1 疲勞試驗的狀況

圖 2 縱向焊縫疲勞試驗結果

圖 3 限制變化對策的概要

橋板骨架連接處的加固

根據至目前為止的現場調查，發現在部分下承

式桁架、下承式板梁的橋板骨架連接處發生了疲勞裂紋。以下承式桁架為例，通過 3 維 FEM 解析得知，在縱向桁架承托周圍的焊接處以及交叉部位狹縫周圍焊接處發生裂紋，這種裂紋使縱向焊縫應力增大，可能誘發縱向焊縫發生裂紋。對此，我們提出了防止橋板骨架連接處發生裂紋的加固工藝方案。

◆下承式桁架橋板骨架連接處的加固

該部分在細節方面存在問題，以前就發現了數種裂紋。我們首先進行應力測定，並分析疲勞裂紋的發生狀況，針對疲勞討論安全性。結果表明，在橋板骨架連接處存在發生疲勞裂紋的可能性，並且明確這些疲勞裂紋分為“縱向梁承托與垂直加固部件上端交叉部分的焊接處”以及“縱向梁承托與橫向梁交叉部分狹縫內的環焊處”兩種（圖-4）。

然後，為了防止發生造成上述裂紋原因的變形，我們提出了加固方案（照片-2），採用設有加固構件的橋板骨架連接處實物尺寸試件進行靜態荷載試驗及疲勞試驗，確認作為改善疲勞特性方法的有效性，最後將獲得有效性確認的加固方法適用於實際橋樑的加固施工，測定加固前後的應力。結果表明，對於縱向梁承托與垂直加固部件上端交叉部分焊接處以及縱向梁承托與橫向梁交叉部分狹縫內環焊處附近的應力，確認採用加固構件後可降低至該焊接處的疲勞限度以下。

◆下承式板梁橋板骨架連接處的加固

有報告指出，在開框肋板式下承板梁的縱向梁與橫向梁的焊接處（圖-5）也發生了疲勞裂紋。

如圖-6 所示，在該部位發生了基本上為 3 種類型（①縱向梁上的邊緣凹口處，②縱向梁下的邊緣凹口處，③縱向梁梁腹鉚釘孔）的疲勞裂紋。如果這些裂紋繼續延伸，設有橫向梁的縱向梁的連續性喪失，與桁架相同，縱向梁的縱向焊縫應力將增大。

對此，我們通過靜態荷載試驗討論縱向梁與橫向梁連接處的加固方法，決定了可最有效降低應力的加固結構。如照片-3 所示，在橋板骨架連接處設置船形托架等，在圖-6 所示的 3 類裂紋發生位置取

得了降低應力效果。

圖 4 橋板骨架連接處的疲勞裂紋（下承式桁架）

圖 5 開框肋板式下承板梁

圖 6 橋板骨架連接處的疲勞裂紋（下承板梁）

照片 2 橋板骨架連接處採取對策前後的狀況

照片 3 船形加固對策（下承式板梁）

桁架承托處的對策

對實際橋樑進行的應力測定結果表明，承托處或承座的功能降低可能顯著增加縱向焊縫的應力。尤其對於桁架採用焊接底板架設的鋼結構橋，應力在底板焊接處發生，存在疲勞損傷向主樑邊緣及梁腹延伸的重大問題。

更換承座前後底板焊接處前面的應力測定位置如圖-7 所示，測定結果如圖-8 所示。在底板焊接處前面發生較大的應力，下緣發生扭曲。將更換前後的承座應力進行比較，測定結果表明，更換前應力較高，是更換後應力的大約 10 倍，因此需要維持承座的健全性。

圖 7 測定位置

圖 8 承座更換前後的應力比

總結

迄今為止，裂紋發生後的延伸速度較快，對難以採取檢查措施的縱向焊縫的疲勞裂紋，需要在不久的將來更換構件。然而此前的研究結果認為，加固橋板骨架連接處防止橋板骨架連接處發生變形，實施桁架承托處的對策，可延長鋼結構橋的壽命和強化耐力。此外關於特大輪重，由於在無道床橋樑也發生，因此防止措施非常重要。作為對策，根據從根本上變更軌道結構的考慮，向現有枕木之間新插入枕木形成板支撐結構，可限制輪重變動。有關該內容將另行說明。今後，我們將採用這些對策工藝，致力於實現東海道新幹線鋼結構橋的長壽命

化，提高耐力。關於構件更換的必要性，我們將繼續監視其效果，予以進一步討論。



(12~15 頁)

首都高速公路的維護管理

首都高速公路株式會社 岡田 昌澄

首都高速公路株式會社 溝口 孝夫

首都高速公路技術中心 相川 智彥

首都高速公路是為了緩解日本的首都東京及近郊地區長期性交通擁擠而建設的汽車專用公路。在東京奧運會開幕的 1964 年，大約 33km 高速公路投入使用，隨著日本經濟的成長，高速公路建設不斷推進，在約 50 年後的 2010 年，首都高速公路已達到 301.3km。2010 年（財會年度），首都高速公路創造了日本首屈一指的交通量（12 小時 11.5 萬輛，每小時 1.1 萬輛）。現將這條收費高速公路的維護管理概要介紹如下。

特點

從 1958 年開始，首都高速公路的建設和維護管理由首都高速公路公團負責，後來因行政改革，從 2005 年開始由首都高速公路株式會社負責。

在總長 301km 的首都高速公路中，分為從構成網路的區間向一個方向的 2 車道（雙向 4 車道）或者向一個方向的 3 車道（雙向 6 車道）兩種類型。

為了建造首都高速公路，我們最大限度地利用原有河流、運河以及道路等公共用地的上方空間。因此首都高速公路在結構上，平面道路占 5%，橋樑及隧道等結構體占 95%。此外，橋樑的比例占總長度的 80%。具體為橋樑合計約 11,800 跨（鋼樑 RC 橋板 7,770 跨，鋼樑鋼結構橋板 1,340 跨，PC·RC 梁 2,690 跨），橋墩合計 8,680 座（鋼結構 2,885 座，RC

結構 5,795 座）。

目前，每天約有 180 萬人次利用首都高速公路。每天的總交通量約 100 萬輛，其中大型車輛約 10 萬輛。在這裏，交通量為從構成網路的區間向一個方向每天 8 萬輛（3 車道）至 1500 輛（2 車道），具有一定的範圍。

為了安全實施高速公路的檢查和維修加固施工，需要臨時減少車道保證作業場地。由於這個緣故，為了盡可能避免交通擁擠，對於交通繁重的區間避免白天作業，在交通量較少的夜間實施。

2012 年度（財會年度），用於首都高速公路維護管理及運營的費用為 610 億日元。其中用於結構體的檢查及維修加固費用為 420 億日元，作為運營收費高速公路的必要費用為 190 億日元。

檢查、維修系統

為了持續實施首都高速公路的維護管理，如圖 -1 所示，我們實施（檢查）計畫→檢查→判定→應對（維修、加固）→（檢查）計畫的系統性作業。

關於檢查，按照目的和頻度分為日常檢查（巡檢、徒步檢查）、定期檢查（接近檢查、使用設備檢查等）以及臨時檢查（發生地震時等）。

—日常檢查是掌握結構體有無損傷、道路上有無掉落物體等的檢查。有原則上每 2 小時進行一次的巡檢到 5 年一次的伸縮裝置等的徒步檢查，在檢查頻度上各不相同。

—定期檢查是為了詳細瞭解結構體等的損傷狀況而接近結構體、原則上 5 年進行一次的檢查，是最基本且重要的檢查。

—臨時檢查是在發生大地震以及暴風雨後掌握結構體有無損傷以及損傷程度的檢查。

關於維修部位，根據檢查結果的損傷等級判定，運用資料庫（維護資訊管理系統）決定。完成維修後，向資料庫輸入維修記錄，作為資料保存，用於制訂下次檢查和維修計畫方案。

構成日常檢查的巡檢如照片 -1 所示，徒步檢查

如照片－2 所示，構成定期檢查的接近檢查如照片－3 所示，使用設備檢查如照片－4 所示。

圖 1 檢查、維修系統

照片 1 巡檢（巡檢車在高速公路上行駛，確認結構體的變化）

照片 2 徒步檢查（對高速公路進行夜間交通管制，由檢查員步行檢查結構體）

照片 3 接近檢查（使用高空作業車進行檢查，在不影響道路交通的地點可進行白天作業）

照片 4 使用設備檢查（對結構體的焊接部位進行超聲波探傷檢查）

維修、加固例

對路面的車轍和裂紋進行路面重新鋪設，對鋼結構體的生銹進行重新塗裝，除此之外，鋼結構體的疲勞現象成為維修和加固的課題。以下介紹疲勞損傷的事例。

◆鋼結構橋墩拐角部位發生的疲勞裂紋

1997 年，我們在鋼結構橋墩的拐角部位發現了裂紋。根據詳細調查，該裂紋是延伸性疲勞損傷。此外，我們採用實物尺寸的試件進行疲勞試驗，推測疲勞損傷的發生原因。通過進一步討論，為了緩和裂紋發生位置周邊的應力集中，對原有橋墩採用了使用高強度螺栓連接鋼板的工藝。

疲勞裂紋的發生位置如圖－2、照片－5 所示，採用鋼板的加固方法如照片－6 所示。

圖 2 鋼結構橋墩拐角部位的疲勞裂紋發生位置

照片 5 疲勞裂紋的發生狀況（在柱與梁交叉的焊接線上發現）

照片 6 對鋼結構橋墩附加鋼板進行加固。

◆鋼結構橋板發生的疲勞裂紋

在鋼結構橋板上也發現了不少疲勞裂紋。其中關於在鋼結構橋板與槽筋之間的焊接連接處發生的

疲勞裂紋，也確認了發生向橋板板厚方向延伸貫通的情況。

對於這種現象，我們將瀝青路面更換成澆築彈性係數較大的 SFRC（鋼纖維增強混凝土），通過其剛性抑制在鋼結構橋板與槽筋之間的焊接連接處發生的變形。

為了確認這種加固的效果，需要決定必要的材料和結構，因此我們實施疲勞試驗，改換原有 8cm 厚的瀝青路面，澆築厚 5cm 的 SFRC（鋼纖維增強混凝土），在其上鋪設厚 3cm 的瀝青路面。

採用這種工藝時的鋪設結構及 SFRC 的澆築狀況如照片－7 所示。

照片 7 鋼結構橋板的疲勞對策（SFRC 加固）施工狀況（藍色為環氧樹脂）

◆RC 橋板的疲勞對策

關於 RC 橋板的加固，為了緩和在 RC 橋板發生的動荷載造成的彎矩，通常採用在主樑之間增設 1 根至 2 根縱梁的工藝，或者採用連接鋼板與原有的 RC 橋板成為一體承受發生彎矩的工藝。然而由於這些工藝使用鋼材，因此需要堅固的臨時腳手架，對安裝構件的操作也需要予以特別注意。

後來我們明確，RC 橋板的損傷進展也是由於通行車輛導致發生的疲勞現象，從而確立了採用新材料的加固工藝。

我們採用在橋板的背面粘接碳纖維板的工藝。粘接碳纖維板、完成塗裝後的照片和施工狀況的照片如圖－8 所示。

圖 8 對 RC 橋板採用碳纖維板加固（對橋板直接粘貼碳纖維板。為了防止環氧樹脂劣化進行塗裝。）

有關大規模更新的討論

長期以來，我們對結構體進行檢查，根據檢查結果實施維修。然而首都高速公路的總長達

301km，通車後已使用 40 多年的結構體約占 30%（總長度：100km）。因此，多年來保證大量車輛通行的結構體也發生很多損傷，並且發現了重大損傷。

在總長 301km 中，對於發現重大損傷而需要更新的結構體，制訂了實施約 8km 的橋樑重建或更換橋板的計畫；對於需要進行大規模維修的約 55km，制定了對結構體總體實施維修的計畫。此外，這些工程的概算費用分別為 3,800 億日元及 2,500 億日元，合計為 6,300 億日元。

首都高速公路株式會社以實現安全和舒適的交通為目標，向用戶提供滿意的優質服務。今後，我們仍將本著上述方針，繼續開展維護管理業務。

關於首都高速公路株式會社

有關首都高速公路的維護管理及其他業務的資訊，可流覽以下網頁獲取。

— 首都高速公路株式會社概要

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

— 首都高速公路株式會社的維護管理

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



（16～18 頁）

從 RC 橋板向鋼橋板的更換：美川大橋

Eight—Japan 技術開發株式會社

美藤友郎

美川大橋坐落在主要地方道路金澤小松線橫跨手取川的地點，是橋長 398m 的鋼跨（2+3+2）連續非合成板梁橋。由於交通量的增加和環境中鹽分的影響，RC 橋板不斷劣化，同時鑒於需要在上游側設置人行道（擴寬）以及應對 B 動荷載等問題，我們採用鋼橋板更換了 RC 橋板。以下介紹本設計的

概要。（請參照圖 1）

圖 1 美川大橋斷面圖（更換橋板的前後）

橋樑的概要及經過

美川大橋位於石川縣白山市美川南町，是架設在距離一級河流手取川河口約 200m 地點的橋樑。橋長 398m（跨距為 51.0+58.6+58.6+59.0+58.6+58.6+51.0m），上部結構為 2 座鋼結構 2 跨連續非合成板梁橋、1 座鋼結構 3 跨連續非合成板梁橋，下部結構為 RC 壁式橋墩，基礎結構為開口沉箱基礎。（圖 2）

在美川大橋的上游側，有於 1938 年架設的美川橋，直到美川大橋通車的 1972 年為止，美川橋作為公路橋使用，美川大橋竣工後作為自行車和人行道使用。（照片 1）

然而從河流阻礙率的觀點考慮，提出及早拆除美川橋的要求，在美川大橋上游側以哪種形態設置用於替代的人行道是長期以來的課題。此外，雖然在 1997 年至 1998 年對美川大橋實施了主樑的 B 動荷載加固，但在另一方面，混凝土橋板發生劣化（鋼筋腐蝕、被覆混凝土剝落），需要解決人行道擴寬（增設）、橋板的 B 動荷載加固以及輕量化（抗震加固）等各種問題。

圖 2 美川大橋的橋樑總圖

照片 1 美川大橋和美川橋

為了長期使用美川大橋的課題和著眼點

美川大橋存在的課題如以下（1）～（3）所示。

◆RC 橋板發生劣化

關於 RC 橋板，在以往進行的調查（1996 年）中發現了許多裂紋以及被覆混凝土剝離，在後來的橋樑檢查中發現劣化進一步發展。2006 年進行的氯根離子含量調查結果表明，鋼筋位置的氯根離子量不久將達到生銹限界的程度，設想今後因鹽害導致

的鋼筋腐蝕會發生急速劣化。(照片 2)

照片 2 RC 橋板鋼筋的暴露狀況 (2006 年拍攝)

◆在上游側設置人行道的必要性

如上所述，從阻礙河流橫截面積的觀點考慮，決定及早拆除上游側的美川橋(人行道橋)。另一方面，從安全性和便利性的觀點出發，當地的白山市提出了拆除美川橋後在美川大橋的上游側也設置人行道的要求。

◆考慮到抗震加固實現輕量化

另外進行的討論結果表明，如果保持現狀 RC 橋板不變而為了上游側人行道進行擴寬，上部結構的重量增加，橋墩的抗震加固難以實現。因此，為了提高橋樑總體的抗震性能，輕量化成為一項條件。

關於解決上述 3 個課題的方法，包括寬度構成在內進行討論，從結構性、施工性以及對原有橋墩影響的觀點考慮，作為更換橋板的討論結果，由於可兼顧寬度增加和減少靜荷載，並可配合已實施的 B 動荷載加固，同時對抗震加固保留現實性加固量，可實現輕量化，因此採用了更換成鋼橋板的方案。

保證現有道路交通的更換計畫

將 RC 橋板更換成鋼橋板時，關於最佳寬度構成，我們從以下兩方面進行討論。

◆著眼于完成時的主樑應力度討論寬度

關於完成時的寬度構成，從主樑應力度的觀點考慮，我們對 B=12.6m、13.6m、14.6m、15.6m 的 4 種方案進行試算。討論結果表明，為了使已實施 B 動荷載加固的主樑應力度在允許值範圍內，總寬度需要保持在 13.6m 以下。

◆著眼於施工討論寬度(圖-3)

關於橋板的更換，由於早晚交通量較多，在橋的端部設有交叉點，因此擔心發生交通擁擠，所以將施工時保證 2 條車道(單向 1 條車道)作為前提

條件。保證施工時 2 條車道的最低寬度為 $0.4 + 6.0 \times 2 + 0.3 \times 2 + 0.2 + 0.4 = 13.6\text{m}$ 。

根據上述兩方面的討論結果，我們採用了 13.6m 的最佳寬度。

圖 3 著眼於施工討論寬度

更換橋板的設計方針

◆主樑的應力核對

雖然美川大橋屬於非合成梁結構，但在更換成為鋼橋板時，考慮鋼橋板縱梁與主樑的合成效果，按照以下考慮進行應力核對。

- ①對於架設鋼橋板之前的靜荷載，僅由原有主樑斷面承受。
- ②對於架設後的靜荷載和動荷載，由包括鋼橋板的合成斷面承受。
- ③在每一步增加①、②的應力度進行應力度核對。
- ④關於原有主樑斷面，由於因腐蝕發生了主樑板厚減少，所以在斷面計算時根據調查結果，減少腹板及下緣板厚進行計算。此外，對已完成原有梁的覆板加固部分予以考慮。

圖 4 合成梁的斷面

◆步驟計算

如在(1)中所述，由於考慮鋼橋板與原有主樑的合成效果進行主樑應力核對，以及考慮交通管制而採用階段性施工，因此各施工階段的結構系統不同。為此考慮如圖-5 所示的施工步驟，對各施工階段的應力狀況實施核對，關於施工時的安全性、完成時的主樑應力度、支撐反作用力以及防止橋樑塌落的设计荷載等，經核對沒有超過允許值和設計荷載。

施工步驟的概要如下所示。

圖 5 施工步驟圖

施工時對原有橋板的加固

關於在保證 2 條車道通行的條件下更換橋板，對於在施工中途階段的原有橋板，由於中央的中間橋板成為突出橋板，並且作為人行道設計的橋板厚度較薄（16cm），向下游側突出的橋板部分承受車輪荷載的作用，因此採用臨時縱向梁及托架進行加固（圖-6、照片 3）。

圖 6 下游側橋板加固圖

照片 3 橋板加固托架

結語

本橋的鋼橋面更換施工於 2010 年度動工，並於 2014 年春竣工。

拆除發生劣化導致承載力降低的原有 RC 橋板更換成為鋼橋板，實現橋樑的長壽命化，並實現總體輕量化，可提高抗震性能。此外，由於在上游側附加了人行道，可拆除美川橋而不會影響原有的方便性。

另外，施工時也沒有設置臨時橋樑，將對交通的影響降低到最小程度，同時實現了縮短工期和降低總體成本。（照片 4）

如果本文能夠對今後越來越多的橋板更換計畫起到參考作用，我們將非常欣慰。

照片 4 更換橋板後的美川大橋



（封底）

日本鋼鐵聯盟的活動

計畫在柬埔寨舉行有關鋼結構的第二屆會議

日本鋼鐵聯盟（JISF）計畫於今年 12 月在柬埔寨

的金邊舉行以“Recent Technologies for Steel Structures 2014（鋼結構的最新技術 2014）”為主題的會議。本屆會議將由 JISF、柬埔寨公共事業運輸部（Ministry of Public Works and Transport，簡稱 MPWT）以及柬埔寨工業大學（Institute of Technology of Cambodia，簡稱 ITC）聯合主辦。今年 6 月初，JISF 與兩個合作方在金邊召開了準備會議。

本屆會議由數個會議部分構成，在以一般工程技術人員為物件的會議部分，將由日本和柬埔寨兩國專家發表 5 項港灣和橋樑以及大廈的鋼結構技術演講。在接下來由兩國重要人物出席的會議部分，將開展有關鋼結構在柬埔寨推廣普及的討論。

2012 年 12 月，JISF 曾在金邊與 MPWT 和 ITC 共同主辦了有關鋼結構的第一屆會議。

請對讀者問卷調查提供協助

本刊《Steel Construction Today & Tomorrow》由日本鋼鐵聯盟與日本鋼結構協會聯合編著，每年出版 3 期，是唯一定期發行的英文期刊，主要以亞洲各國的建築相關人員為物件，介紹與日本的鋼結構相關的技術資訊。為了準確瞭解讀者的需求，進一步發揮本刊的作用，我們將在發行 2014 年度的 3 期期刊時進行讀者問卷調查。問卷調查表格可通過以下方法獲得。

* 日本鋼鐵聯盟的網站

問卷調查表格登載在日本鋼鐵聯盟的網站上，可直接填寫回答。您可通過以下方法方便地流覽。

1. 通過檢索網站輸入“JISF”搜索。
2. 在日本鋼鐵聯盟的英語網站上點擊橫幅廣告。
3. 點擊 Questionnaire。

* 通過傳真回答

對於定期訂戶，我們將隨本刊送上問卷調查表格，請在表格中填寫回答。

通過問卷調查將進一步發揮本刊的作用，從而對日本的鋼鐵行業與貴國的相互發展做出貢獻。我

們期待著您的積極回答。