

# 日本前谷桥的设计与施工

黄卿维 陈宝春 编译  
(福州大学土建学院 福建 福州 350002)

**摘 要:** 日本前谷桥是首座采用预应力全体外索的波形钢腹板桥梁。采用预应力全体外索技术, 避免体内索施工时预埋管道的复杂工艺, 也便于使用阶段的检查和预应力索的替换。该桥通过重复使用临时预应力杆件, 实现了悬臂施工, 节省了耗材, 方便了施工。本文对该桥的设计要点、足尺模型试验以及施工进行了介绍。

**关键词:** 预应力; 全体外索 波形钢腹板 悬臂施工

**中图分类号:** TU35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004 - 6135 (2005) 01 - 0050 - 04

## Design and Construction of the Maetani Bridge in Japan

HUANG Qing - wei, CHEN Bao - chun

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, 350002)

**Abstract:** General situations on the project and structural behaviors of the Maetani bridge are introduced. The structure in longitudinal direction and external tendons are analyzed. Finally, the key issues on the design and construction and the full - size test are discussed.

**Keywords:** Prestressing; entirely external tendons; corrugated steel webs; cantilever erection

日本自从 1951 年建造了第一座预应力混凝土桥梁后, 在悬臂施工方法的推广、新材料、新技术的应用方面都取得了很大的发展。采用波形钢腹板、预应力体外索的混凝土箱梁桥, 就是其代表性的成果之一。目前, 已建和在建的波形钢腹板预应力箱梁桥已达到三十余座。本文将简要介绍日本首座采用预应力全体外索的波形钢腹板桥梁——前谷桥的设计要点和施工概况。

### 1、工程概要

该桥是高速公路上的一座桥, 所在道路等级为一类二级路 (设计车速为  $V = 100\text{km/h}$ )。设计荷载为 B 类活载。采用波形钢腹板预应力箱梁的 T 形刚构桥。该桥上下行分离, 上行线桥长 163.000m, 跨径布置为 77.300m + 84.300m; 下行线桥长 160.000m, 跨径布置为 75.300m + 83.300m。上下行桥梁宽度均为 10.840m, 有效宽度 9.25m。该桥于 2001 年 10 月建成。图 1 所示的是桥梁总体布置图, 图 2 为建成后的照片。

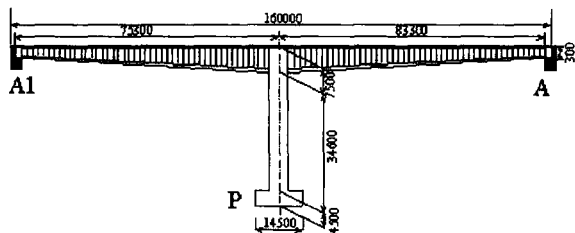


图 1 前谷桥的总体布置图 (单位: mm)

### 2、设计与计算

#### 2.1 结构特点

图 3 给出了前谷桥的结构布置示意。该桥结构上最显著

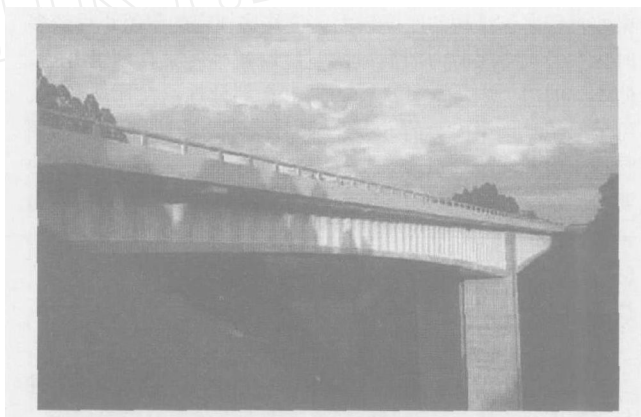


图 2 前谷桥照片

的特点是采用预应力全体外索系统。体外索在预应力混凝土桥梁中的使用是近来桥梁建设的发展之一 [2]。从预加应力方式来看, 预应力全体外索就是把纵桥向所有的预应力钢束布置在混凝土截面外, 通过锚固端和变向装置来传递预加应力。它具有以下几个优点: 混凝土板内没有预埋管道, 板厚减小, 从而减轻了桥梁的自重; 预应力索安装简便; 易于检查预应力索, 有利于索的养护; 预应力索的替换或者再次张拉成为可能; 大大地缩短施工工期, 特别是使用预制分段拼装方法施工的桥梁。

除了采用预应力全体外索, 该桥还使用了新颖的结构以及技术进行施工, 其中包括临时预应力杆件、体外索锚固系统以及剪力连接件, 具体阐述如下:

- (1) 利用临时预应力杆件和高强体外索进行悬臂施工。
- (2) 布置在上翼缘板的横向钢索采用预灌浆钢索, 不需现场水泥灌浆。

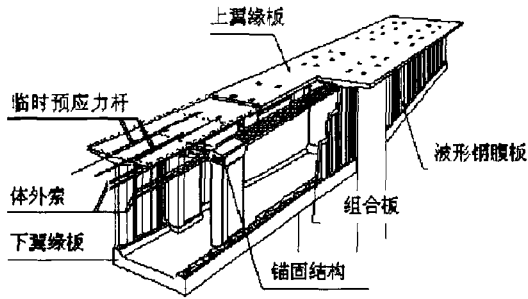


图 3 前谷桥的构造布置

(3) 采用透明的聚乙烯乙烯基氯化物管道和水泥浆来对体外索进行防腐保护。

(4) 为了减轻结构自重，体外索锚固部分采用组合结构。

(5) 在靠近墩顶的部分，即箱梁高度大于 5.0 米的部分，腹板采用钢 - 混凝土组合腹板，以防止腹板的压屈破坏。组合腹板由外侧的波形钢板和内侧的现浇混凝土组成。

(6) 采用 U 形剪力连接件连接混凝土顶底板和波形钢腹板 (这种形式的连接件广泛地应用于法国 Dole 桥)。

### 2.2 纵桥向结构分析

通过平面框架分析方法对纵桥向结构进行分析，并对体外索进行构件评估。在体内预应力桥梁的结构分析中，一般不考虑主梁轴线的变化，但是该桥为了比较准确地得出造成体外索预应力偏差的因素，特地考虑了主梁轴心的曲线变化。

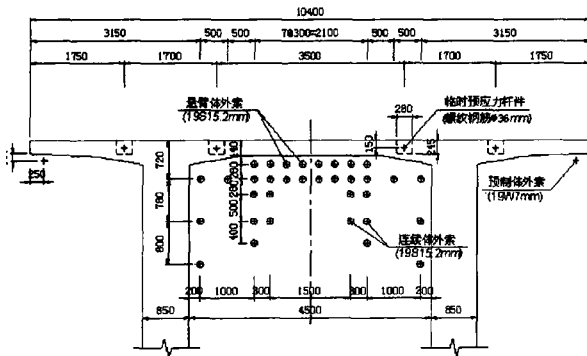


图 4 预应力索的截面布置

由于波形钢腹板的折迭效应，往往只考虑其平面内的剪切刚度，而不考虑纵桥向刚度。在组合截面中，假定截面平面刚度只是折叠混凝土板的平均刚度，而不考虑波形钢板对总体刚度的贡献。在计算极限设计荷载时采用 DN4227 规范<sup>[3]</sup>。

### 2.3 预应力筋的布置

该桥的预应力筋的截面布置详见图 4。纵向的预应力索由三部分组成：临时预应力杆件，体外悬臂索和体外连续索。每个现浇段至少有 4 束直径 36mm 的螺纹钢提供临时的预应力，而结构系统的抗力主要由 28 束体外悬臂索提供，每束钢索由 19 股直径为 15.2mm 的钢绞线 (SW PR 7BL) 组

成，而且还有 6 到 8 束的体外连续索贯通全桥，用于抵抗活载产生的正弯矩。

若体外索集中布置在箱梁内部，预加应力就不能有效地加载于悬臂板前端。在前谷桥中，预应力索被安排在悬臂板下，可以有效地对前端悬臂板施加预应力，而且集中布置高强度体外索的安全性也得到提高。通过有限元分析，比较了体内布筋与体外布筋在前端悬臂板的应力状态，发现两者的应力值相差大约  $0.6 \text{ N/mm}^2$ ，因此应该对不同的应力状态使用不同的张拉应力。此外，由于箱内预应力钢索直接暴露在空气中，受到紫外线的照射，故设计采用了在斜拉桥中应用广泛的、耐久性能强的预制钢索 (19W 7mm)。

在悬臂施工中，截面内布置临时预应力杆件 (36 螺纹钢)，以保证截面的拉应力小于  $1.0 \text{ N/mm}^2$ 。使用 PVC 刚性管 (VP-50) 作为临时预应力杆件的套管，像以往的悬臂施工布置体内预应力索一样布置在上翼缘板内。由于张拉、放松以及抽取临时预应力杆件的需要，所以上翼缘板预留了纵向 340mm、横向 280mm、竖向 245mm 的箱形孔洞，用来放置千斤顶 (图 5)。

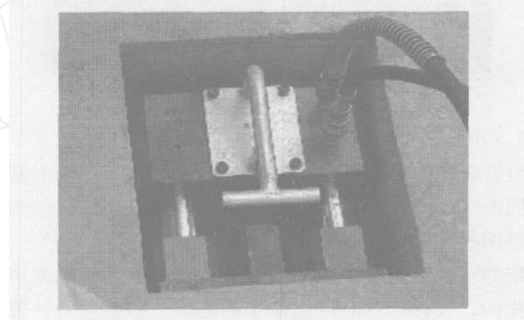


图 5 千斤顶

### 2.4 波形钢腹板及接合部的设计

本桥的尺寸构造大部分参考了波形钢腹板桥的成功实例——法国 Dole 桥 (详见图 6)。然而，本桥的弯曲半径  $r = 120 \text{ mm}$ ，大于日本公路桥梁规范中规定的  $7t$ ，为了保证钢板在直板部分安全受力，应对每块钢板的连接件以及组合板中销钉的布置进行详细的设计。

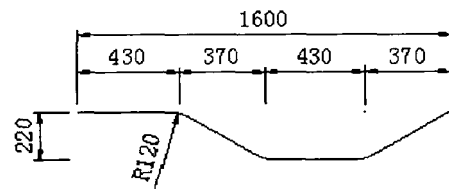


图 6 波形钢板构造图

根据波形钢腹板混凝土桥梁设计手册<sup>[5]</sup>，采用了 SM490YA 作为波形钢板的材料。假定波形钢板承担结构所有的剪应力，而控制钢板厚度的剪应力必须低于容许应力值 (指在局部屈曲、总体屈曲或者合成屈曲状态下的结构所能承受的极限应力值)，所以设计的钢板厚度为 9mm 或者 12mm。

为了避免钢板在与角钢焊接过程中由于焊接缺陷导致产

生裂缝或脆性断裂，翼缘钢板采用 SM400，其厚度取 16mm，而填角焊缝也有足够的长度，以抵抗纵向的水平剪力和横向的面外弯矩。

采用高强螺栓连接两块波形钢板，而混凝土板和波形钢板之间使用 U 型连接件进行连接。该连接件由两组 U 形加强杆和角钢构成，角钢上预留了用于穿过连续加强筋的孔洞(图 7)。其中角钢主要承担纵向水平剪力，而连续加强筋以及 U 形加强杆则用来抵抗横向面外弯矩。所采用的角钢和 U 形加强杆与法国 Dole 桥基本一样，角钢尺寸为 150 × 150mm，U 形加强杆的直径为 13mm，而连续加强筋的直径取 19mm。

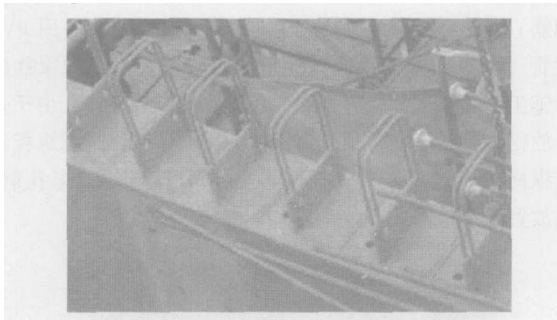


图 7 U 型连接件

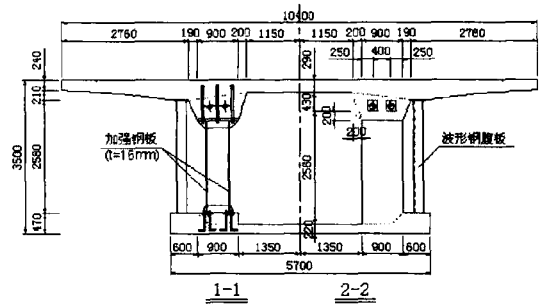
### 2.5 组合板的设计

组合腹板的设计方法与日本公路桥梁规范中的混凝土板是相同的。根据试验模型的有限元分析结果，假设结构剪力是按照钢板和混凝土的剪切刚度(弹性模量 × 厚度)比例来分配的。由于混凝土板的厚度是随波形钢腹板的波形变化而变化的，设计计算时采用最小的混凝土板厚进行计算，因此组合腹板中混凝土部分实际所能承受的平均剪应力和斜拉应力的能力要大于设计计算值。组合腹板中波形钢腹板的厚度与其他单一的波形钢腹板的板厚一样，也为 12mm。

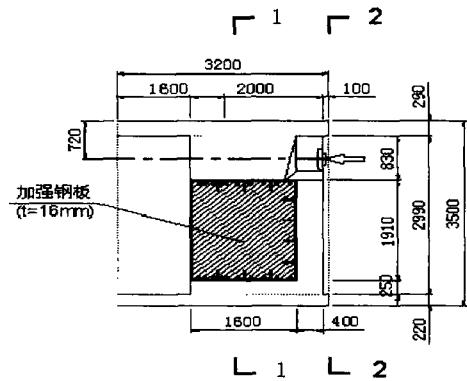
在组合板中，波形钢板和混凝土之间用销钉连接，设计计算时假设它们完全组合在一起。为了确定销钉之间的距离，对试验模型进行了有限元分析。分析结果表明，钢板和混凝土之间剪力配额的变化对销钉的工作应力的影响并不大。因此，销钉之间的间距只需小于规范为防止销钉脱落所规定的最大值，在纵桥向，该值为 600mm，在箱梁高度方向，该值为 400mm。当剪力从跨中的单一的波形钢板传递到靠桥墩处的组合腹板的混凝土中时，靠近接合处的第一排销钉会出现应力集中现象，在这里应采取构造措施，以减小这一排销钉的应力值。

### 2.6 体外索锚固系统的设计

一般桥梁的预应力体外索是锚在顶底板或腹板的凸出的锚固块上。然而，在波形钢腹板箱梁中，只有顶底板承担纵向应力，腹板不承担纵向应力。如果将预应力直接锚固在腹板上，预应力将在腹板中产生附加应力和非平面变形。由于这种附加应力对腹板的局部屈曲影响尚不清楚，所以设计中应将体外索锚固区与腹板分开，并用加强钢板将锚固区与底板联结起来，以使预应力能传到整个截面(见图 8)。



正面图



侧面图

图 8 锚固结构构造图 (单位: mm)

## 3、足尺模型试验

由于该桥为日本首座采用预应力全体外索的波形钢腹板桥梁，为了检验该桥的应力状态及其工作性能，以便于及时地发现问题以及完善设计方案，因而进行了足尺模型试验(图 9)。该模型为悬臂结构，由中间墩柱和两边各长 3.2m 的悬臂段构成的。墩帽长为 3.0m，梁高 3.5m，宽 10.4m。在实桥中，靠近墩柱的两边箱梁中均采用了钢-混凝土组合腹板。而在试验模型中，为了对比，腹板在悬臂的一侧为组合腹板，在另一侧为单一的波形钢腹板。其它的结构形式与材料，试验模型与实桥均相同。试验结果对验证设计计算假定、修改设计、指导施工起到了重要的作用。

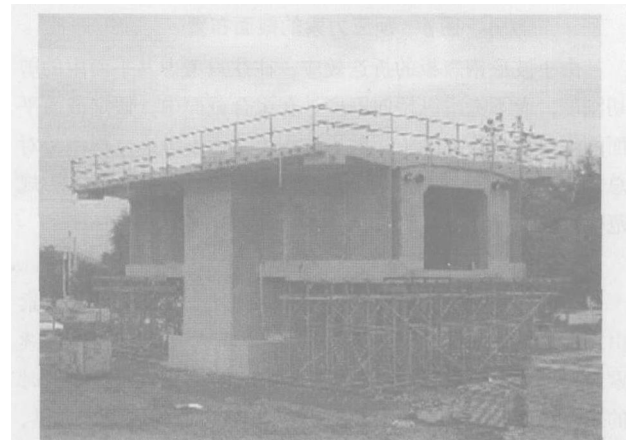


图 9 足尺模型试验

### 4、施工概况

该桥采用了悬臂施工方法，施工步骤详见图 10。在墩柱施工完成后的第一步工序是对墩台上的体外索 C - 1 进行预应力张拉。墩台两侧各立起一个模板架设机，浇注第一段波形钢腹板的悬臂段，并张拉临时预应力杆件 B - 1。临时预应力杆件设置在混凝土上翼缘板，使用双边千斤顶把它锚固在上板 340mm 深的矩形孔洞里。然后移动模板架设机至新的位置，浇注第二块施工段并张拉第二束临时预应力杆件 B - 2。架设机继续往前移，紧接着张拉第二束体外索 C - 2 和浇注第三块施工段的混凝土。抽取临时杆件 B - 1 和 B - 2，并作为 B - 3 及 B - 4 重新投入使用，周而复始直至施工结束。总之，该桥的对称悬臂施工是一个首先浇注混凝土，接着张拉临时预应力杆件 B - ，以及每两到三个施工段张拉一次预应力体外索 C - ，最后放松临时预应力杆件的循环过程 [6]。

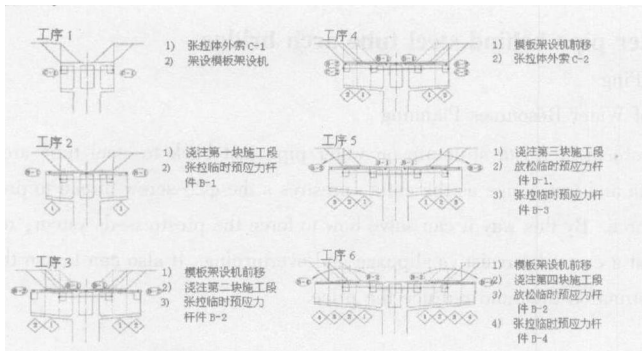


图 10 前谷桥的悬臂施工工序

悬臂施工采用移动起重机进行 (图 11)。起重机的主梁有足够的高度用以悬挂波形钢板，利用四个载重 1.4t 的起重葫芦把波形钢板从后面起吊到前面，通过起重机主梁面上的机车将它移至安装位置进行拼装 (图 12)。

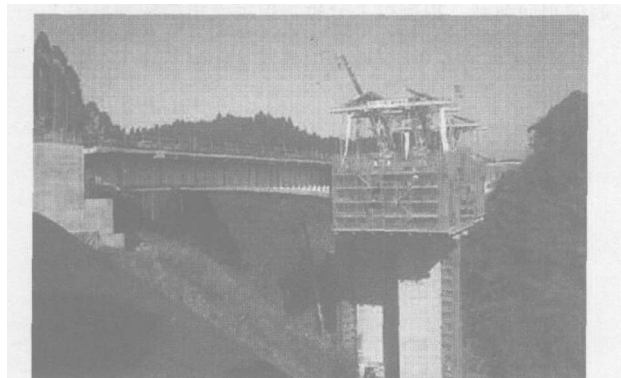


图 11 悬臂施工

预应力索通过绞盘装入透明套管内，而透明套管每隔一段距离 (最长的为 30m) 连接一次。悬臂体外索利用脚手架和钢索悬吊于上翼缘板下，而连续体外索为了避免其自重所产生的变形，只采用单一管道，利用脚手架架于下翼缘板上方 (图 13)。由于纵向坡度的存在，波形钢板形状沿着纵桥向变化，加上施工误差的影响，故每隔一段距离要调整螺栓孔高度和位置。因为钢板上预留的孔洞足够大，所以在每

个施工段就可以调整，而不用等到四个施工段完成后再来调整。桥轴向方向由于压应力所引起的钢板长度的缩短，可以通过最后一个施工段螺栓位置的调整来解决。

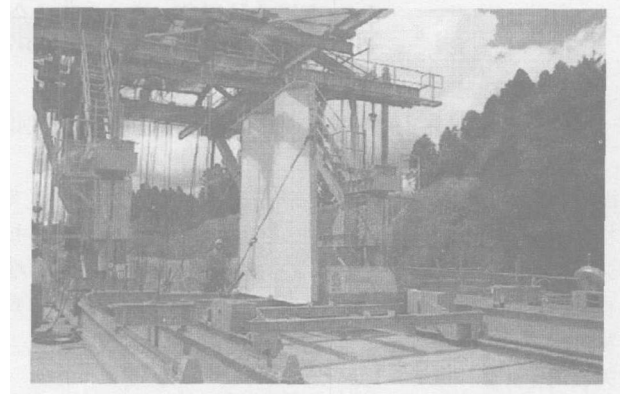


图 12 波形钢腹板的吊装施工

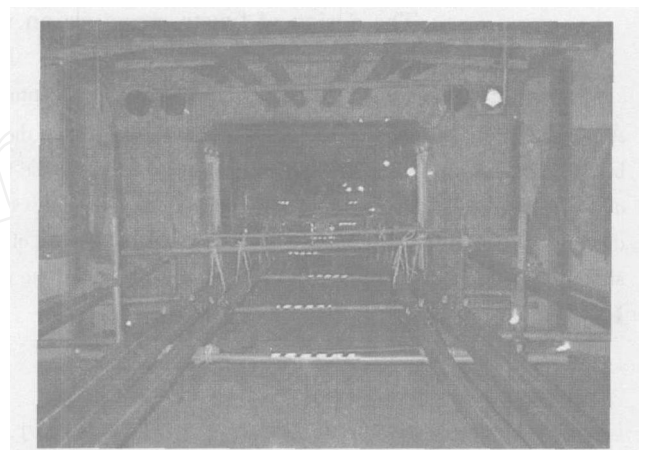


图 13 体外索布置

### 参考文献

[1] Yoshifumi Maeda, Kiyotaka Agawa, Yoshihiro Fujiki and Yasuhiro Miura, Design and Construction of The Maetani Bridge with Corrugated Steel Webs and Entirely External Tendons

[2] 陈宝春,黄卿维,盛叶编译,体外索预应力混凝土桥梁的发展,中外公路,2004年 4月 ,24(2),34 - 37

[3] DN4227, Spannbeton, Bauteil aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Teill, 1988.

[4] Kadotani, Aoki, Shoji and Manuyama., A study of ultimate bearing power for the PC bridge with corrugated steel webs through a entirely external tendons, the 10th Symposium on the Evolution of Prestressed Concrete, October, 2000, Japan,

[5] The society for the study of the composite structure of corrugated steel webs, Planning Manual of PC bridge with corrugated steel webs, (Draft) December, 1998, Japan,

[6] 黄玲,彦板熙,陈宝春等,应用二维折迭联结单元的波形钢腹板 PC梁分析,桥梁建设 (已投稿)