



THE HONG KONG  
POLYTECHNIC UNIVERSITY  
香港理工大學

Opening Minds • Shaping the Future



國家鋼結構工程技術研究中心香港分中心  
Chinese National Engineering Research Centre  
For Steel Construction (Hong Kong Branch)

## S690高強鋼在建築工程中的有效應用



國家鋼結構工程技術研究中心香港分中心  
Chinese National Engineering Research Centre for  
Steel Construction  
(Hong Kong Branch)

2021年度最新活動和成就

## S690 高强钢在建筑工程中的有效应用

国家钢结构工程技术研究中心香港分中心（以下简称「香港钢构中心」）于 2015 年 10 月获中华人民共和国国家科技部批准，得到香港特别行政区创新科技署创新科技基金的资助，在香港理工大学成立。

香港钢构中心是香港唯一一个旨在推动建筑技术创新和工程应用的国家级研究中心。主要任务是推动国产优质钢材钢构可以应用于符合国际标准的基建工程项目，并依照国际规范和创新工程技术，建立起公平的竞争环境，协助优质国产钢材钢构与海外钢材钢构进行公开、公正的竞争，使中国建筑业能够为国际建筑市场作出贡献。

香港钢构中心技术创新的主要目的是：

- 促进香港和中国各地，特别是大湾区的基建设施的可持续发展，以及
- 推动钢结构工程先进技术的进步，尤其是在建筑工程项目中有效使用高性能钢材。

香港钢构中心通过与香港特别行政区政府发展局，香港建造业议会及香港各专业学会的技术合作，支持香港的建造业：

- i) 与中国钢铁工业合作，推广中国钢材与各国材料规范标准的等效性；以及
- ii) 与中国钢结构行业合作，参与国际工程规范和管理准则设计和施工的建筑项目。

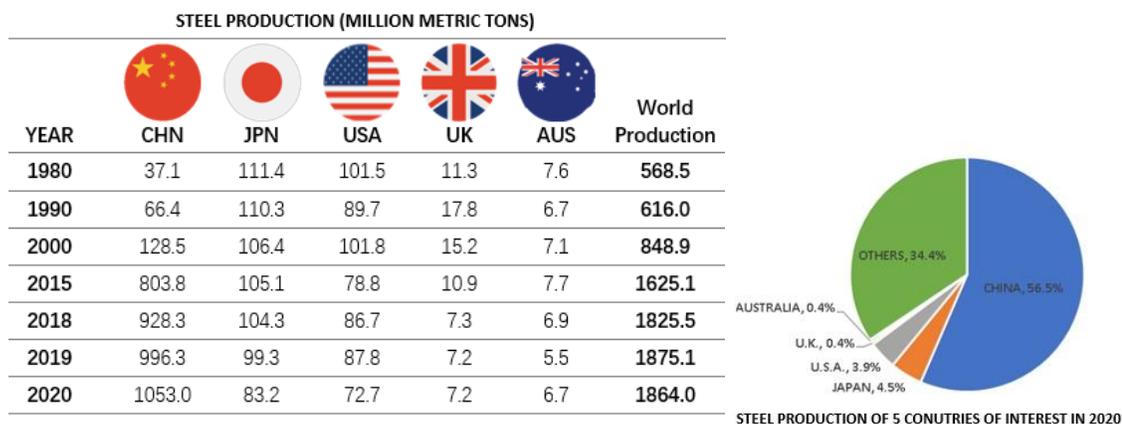


图 1：2020 年世界钢铁产量

## S690 高强钢钢材

随着上世纪九十年代许多先进国家在材料制造方面的技术发展，不少国家，例如德国和日本，已经开始生产 S690 高强钢。在这当中很多高强钢板的厚度为 8 至 30 毫米，通常用于港口和矿山的吊装设备和机器。在这很长一段时间里，高强钢的生产成本比 S355 普通钢的高 70% 左右，这对钢结构建筑来说，由于用钢量大，S690 钢结构的成本效益并不具备足够的吸引力。直到 2010 年后，中国的钢材制造技术飞速发展，钢铁行业中的多间领军企业开始具备制造厚度为 6 至 80 毫米的 S690 高强钢中厚板的能力并能够批量生产。由于在这些 S690 高强钢板的生产过程中，严格控制了金属的化学成分以及热处理的过程，使其具备了良好的机械性能，尤其是在强度和延性方面，都能够符合欧盟标准 EN 10025 和国标 GB 1591 的要求。

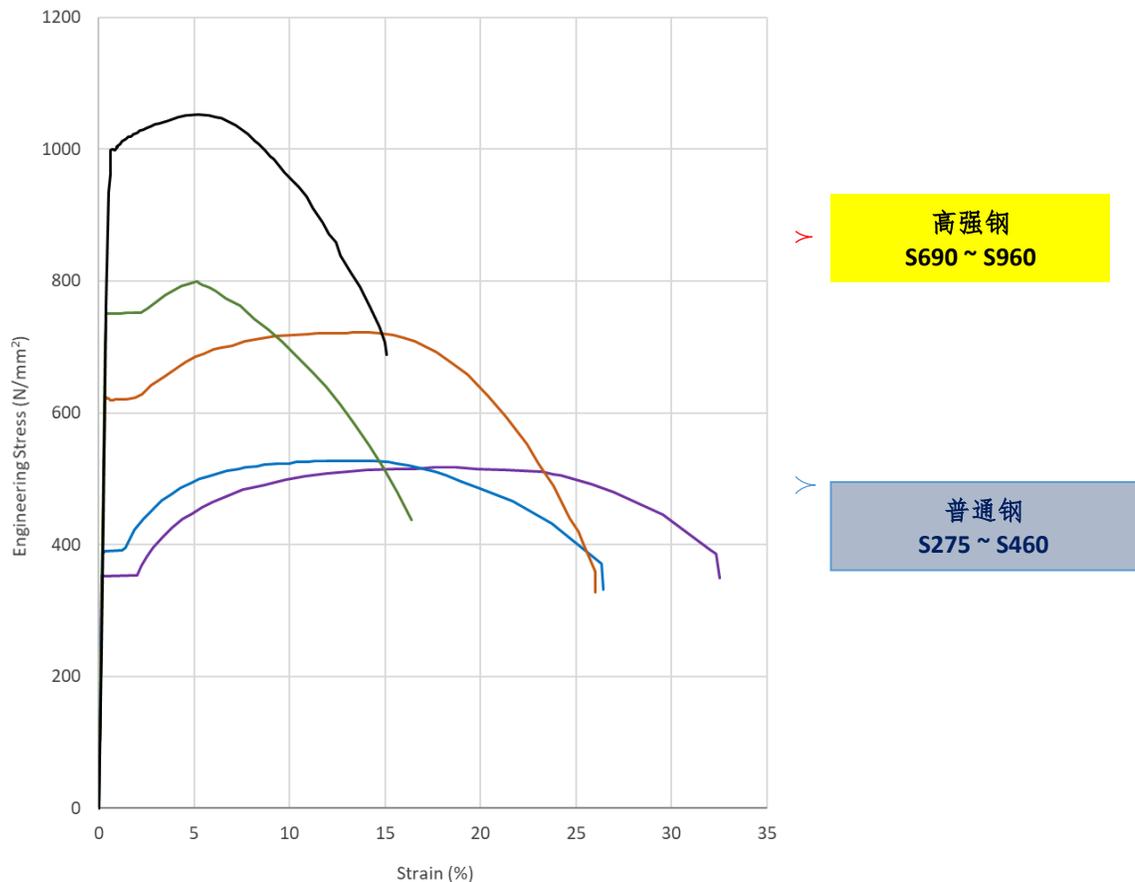


图 2： 应力应变曲线

在最近几年，虽然 S690 高强钢的单位生产成本比 S355 普通钢的成本高 1.3 倍，但通过结构设计，在相同的承载能力要求下，S690 高强钢的用量仅相当于 S355 普通钢用量的一半。因此以总材料成本来计算，使用 S690 高强钢的成本仅为 S355 普通钢的  $1.3 \times 0.5$  或  $0.65$  倍，也就是说，采用 S690 高强钢可以节省 35% 的材料成本。

### S690 高强钢在焊接后的微观结构改变

尽管 S690 高强钢的商用化在上世纪九十年代已经实现，但由于过去三十年中，有关高强钢结构性能和机械特性的研究结果并不一致，因此结构工程师们对于高强钢在实际工程中的应用仍有所顾虑。问题的症结在于 S690 在焊接后的微观结构改变。虽然 S690 高强钢在生产过程中经历了严格温控的淬火及回火过程，最后得到高强度高硬度的微晶粒。但在焊接过程中的升温 and 冷却循环可能会导致其焊接接头热影响区内的微观组织发生相变，再结晶和粗晶粒等微观结构改变。

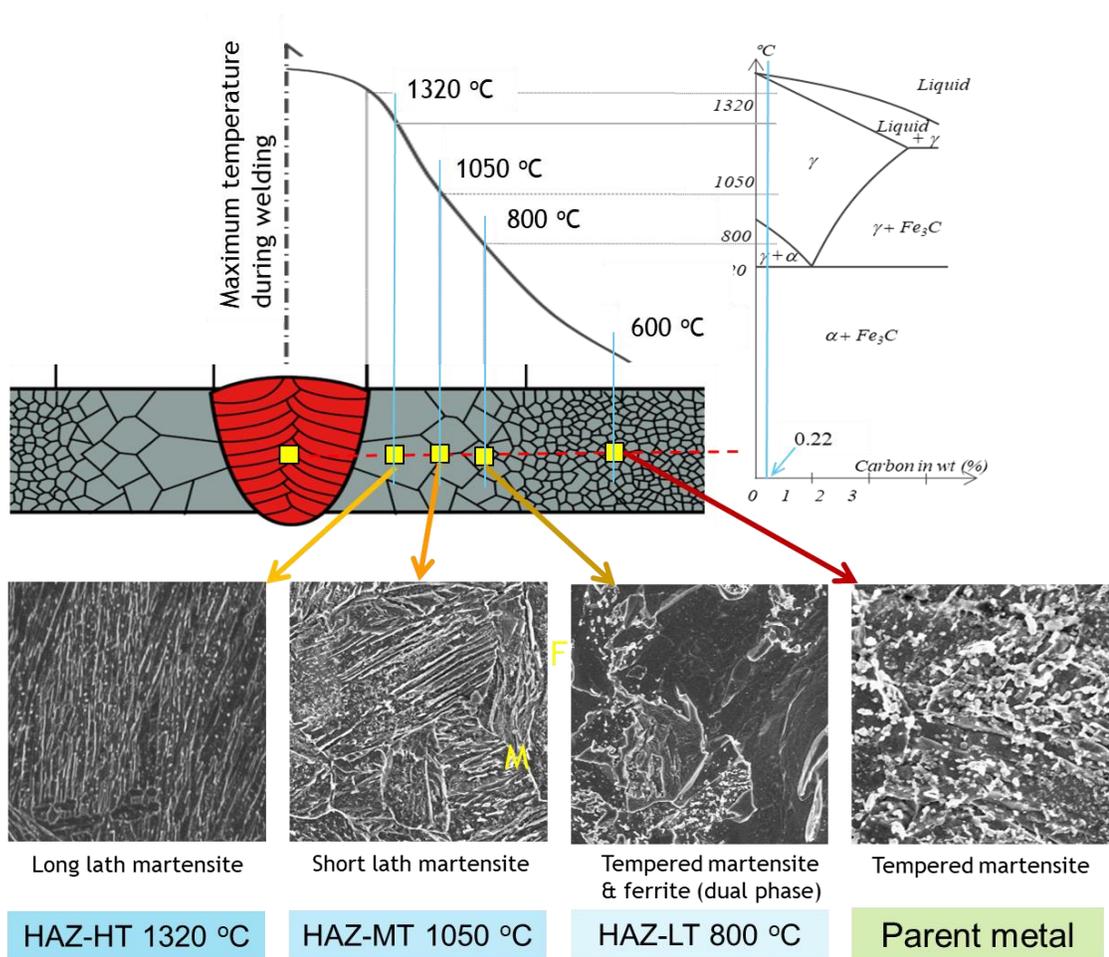


图 3: Q690-QT 钢在焊接后的微观结构变化

如果焊接过程中的最高温度和冷却速率没有得到适当的控制，特别是对于实测厚度为 6 至 80 毫米的钢板来说，其机械性能会发生显著折减。所以必须对高强钢焊接结构的机械性能折减进行评估和预测，更重要的是要有效防止此类机械性能折减的发生。

此外，现在大多数钢结构设计规范在 2000 年左右发布，例如欧盟钢结构规范 EN 1993-1-1 和美国规范 AISC 360。在这些设计规范当中，很多设计方法仍基于 S355 普通钢的实验数据。当将这些规范应用到 S690 高强钢时，由于没有足够的材料和结构实验数据，设计结果往往趋于保守。而且，这些规范都没有提供有关 S690 高强钢的焊接设计方法。

### 香港钢构中心的科研工作：

为了促进 S690 高强钢在建筑工程中的有效应用，香港钢构中心开展了一系列科研项目，以实现以下目标：

- i) 提升对 S690 高强钢有效应用的技术和认可程度，以及推广使用优质国产钢材在工程应用上的潜在优势。
- ii) 开发 S690 高强钢材及焊接结构的机械性能及其在各种实际荷载情况下的结构表现的科学知识和工程数据。
- iii) 制定有关在建筑工程项目中采用 S690 高强钢焊接结构的有效设计准则，并取得监管机构的认可。
- iv) 研发 S690 高强钢厚板（最大 70 毫米）的焊接工艺，及其焊接质量的检测方法。
- v) 与结构工程师合作，在不同的建筑项目中发展 S690 高强钢的创新工程应用。
- vi) 与钢铁生产商合作，研究如何改善 S690 高强钢的抗震性能，以应用于抗震结构中。



图 4： 香港钢构中心机器人焊接系统

### 香港钢构中心有关 S690 高强钢结构研究的主要成果包括：

- 在有关结构工程和现代钢结构技术的世界领先期刊和国际会议中发表了 100 多篇技术论文；
- 参与编写了多部香港和中国内地技术设计指南和规范标准；
- 向欧盟钢结构规范 EN1993-1 技术委员会提供 S690 高强钢材和焊接结构的实验数据和研究成果；
- 开设硕士学位课程科目，推广使用国产优质钢材，依据欧盟标准进行钢结构设计；以及
- 开设钢结构设计短期课程，为结构工程师提供使用国产钢材而进行钢结构设计的专业培训。

### 已完成项目：

- a) 提出 S690 高强钢经历不均匀变形至断裂的全范围真实应力-应变模型
- b) S690 高强钢焊接结构实际焊接过程的热力学数值模拟，以确定焊接过程中的瞬时温度分布以及焊接后的残余应力
- c) 确定具有不同焊接参数的 S690 高强钢焊接截面在受拉情况下的力学性能
- d) 具有不同焊接参数的 S690 高强钢焊接结构在不同应变和加载频率的循环荷载作用下的滞回变形特性
- e) 具有全熔透焊缝的 S690 高强钢 H 型焊接短柱接头在受压下的结构性能和延性
- f) 不同热处理和微观结构变化下 S690 高强钢 H 型焊接短柱的力学性能和结构表现
- g) S690 高强钢 H 型焊接短柱和长柱，冷弯圆管和方管短柱和长柱在受压和压弯组合作用下的结构性能
- h) 部分约束的 S690 高强钢焊接工字型梁在侧向荷载下结构失稳特性
- i) 冷弯圆管和方管在横向弯曲和纵向焊接过程的热机械耦合数值模拟
- j) 冷弯圆管 T 型节点在轴压和平面内受弯荷载下的变形特性
- k) 冷弯圆管 T 型节点焊接过程热机械耦合数值模拟
- l) 依据欧盟钢结构规范 EN1993-1 确定 S690 高强钢焊接结构梁柱的结构设计规范和参数
- m) 完善 S690 钢板的焊接技术，补充各种节点构造的焊接工艺规范

## Strength reduction and softening in S690 welded sections Local deformations and necking prior to failure

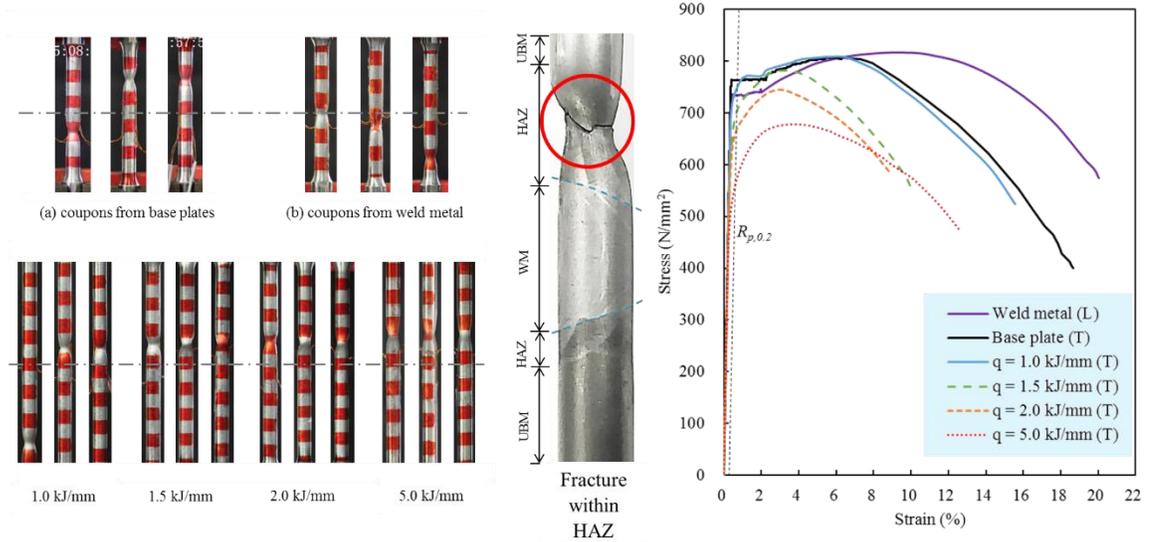


图 5: S690 高强钢焊接结构受拉材性测试

## Stocky columns of S690 welded H-sections with splices

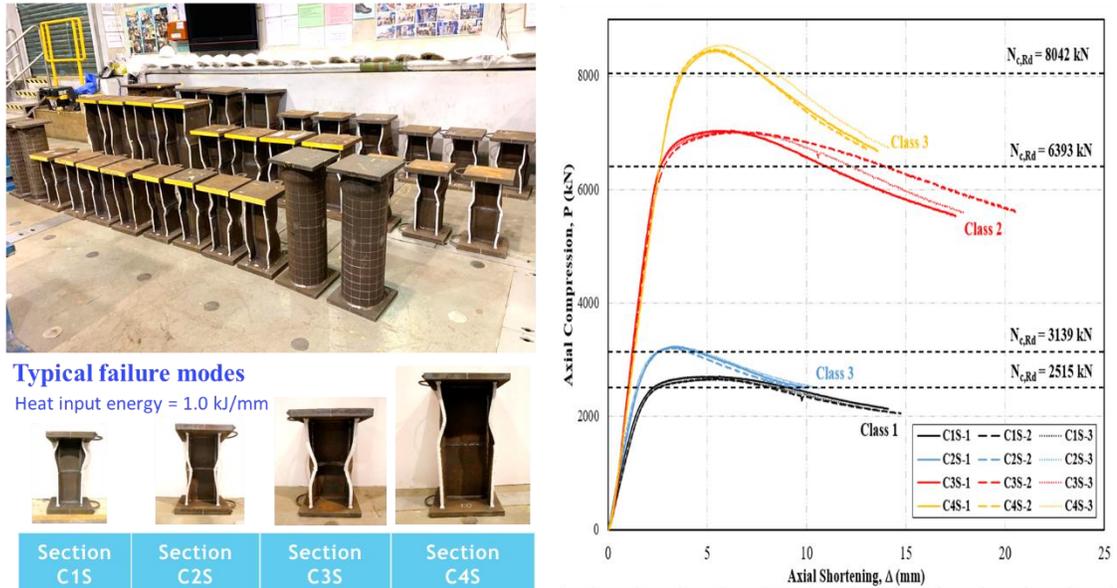


图 6: S690 高强钢焊接短柱受压试验

因此，香港钢构中心的所有 S690 高强钢结构的科研项目具有很高的工程应用价值，藉着这些科研项目可以发展一系列科学理解、工程数据和设计标准，有助于工程师在建筑工程项目中使用 S690 高强钢。香港钢构中心出版的一系列 S690 高强钢结构技术论文和实用设计指南均可用作参考文件，推动 S690 高强钢在建筑工程中的广泛应用。

## 创新工程应用：

S690 高强钢拥有很大的强度/自重比，适用于重型结构构件，如桥梁和建筑的柱子和桩基础。香港**将军澳**跨湾连接桥“活力无限”，是由经验丰富的结构工程师设计和建造，是 S690 高强钢的一个示范性应用工程项目。

## 将军澳跨湾连接路项目

位于香港东九龙将军澳湾的跨湾连接路，是东九龙地区的一项重大基础设施的一部分，其设计目的是舒缓从**蓝田到将军澳** 3.8 公里长的隧道的交通。该项目由香港特别行政区政府**土木工程拓展署**主持建造，包括在将军澳湾的海上，采用 S690 高强钢建造一座跨度为 200 米长的钢桥。这座钢桥也是长达 1.8 公里的**跨湾连接路**的关键部分。

在 2009 年和 2010 年就钢桥的结构设计进行公开咨询之后，双钢拱钢桥的设计概念得以采用，并且由世界领先的桥梁设计顾问公司之一 **AECOM** 在香港进行了“活力无限”的设计。由于 S690 高强钢在材料和成本方面都有很大的优势，因此，S690 高强钢得以在桥梁设计中得到采用。



图 7： 东九龙将军澳跨湾连接路（土木工程拓展署提供）

土木工程拓展署经过严格的招标程序，于 2018 年 6 月将跨湾连接路主桥建造的合约批予**中国路桥**公司。跨湾连接桥的整体造价为 **25 亿港元**。该工程于 2018 年 8 月开始，计划完工日期为 2022 年。由于中国钢材钢构的品质优良，中国路桥决定由上海**振华重工**建造该双钢拱钢桥，同时由江苏**江阴兴澄特种钢铁有限公司**提供优质 S690 高强钢。

这座钢桥总长 214 米，由桥面、钢索和由 S690 高强钢焊接而成的双钢拱组成。双钢拱是弯曲的箱形截面，长 230 米，跨中的最大高度为 40 米。每一个钢拱的横截面尺寸在两端均为 3.5x3.5 米，钢板厚度为 70 毫米，在跨中处为 3.0x3.0 米，钢板厚度为 50 毫米。双钢拱的总重量为 4,400 吨。连同桥面板和钢索在内的钢桥总重量为 **10,000 吨**。这座钢桥整体在上海附近的南通制造厂建造，所有焊接均由经验丰富的焊工进行，并由有资质的检测人员进行无损检测。这确保了钢桥的建造工艺质量。整个建造过程耗时 18 个月，在建造高峰时段，有 170 多名经验丰富的焊工和 30 多名无损检测人员参与。



图 8： S690 高强钢“活力无限”双钢拱钢桥（土木工程拓展署提供）

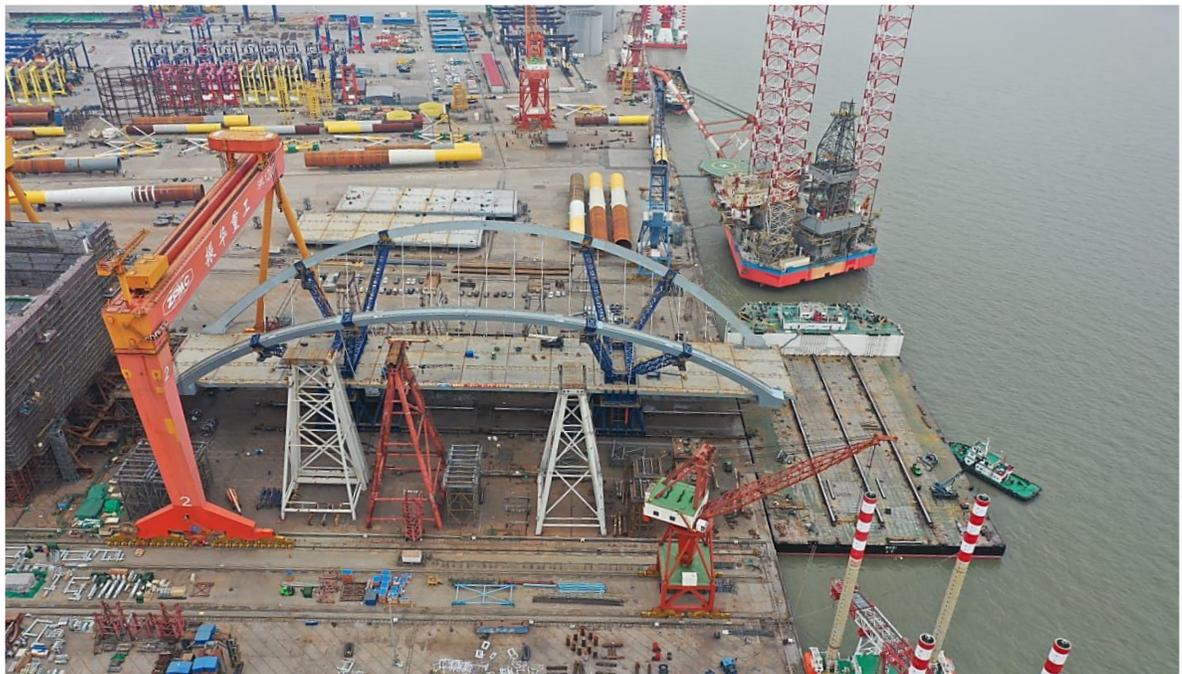


图 9： 完成组装的钢桥：双钢拱，钢索以及桥面（中国路桥提供）

这座钢桥从南通经海路运输到香港将军澳湾总航程为 900 海里。根据过去 60 年的气象数据，每年二月份在这段海域内遇到台风的风险最低。因此，这座钢桥于 2021 年 2 月 8 日清晨从南通出发，经过 8 天的时间于 2月 16 日抵达将军澳湾。2021 年 2 月 26 日清晨，钢桥在早上被安装在两个预制的桥墩上，并在五个小时内将其精确安全地安放。

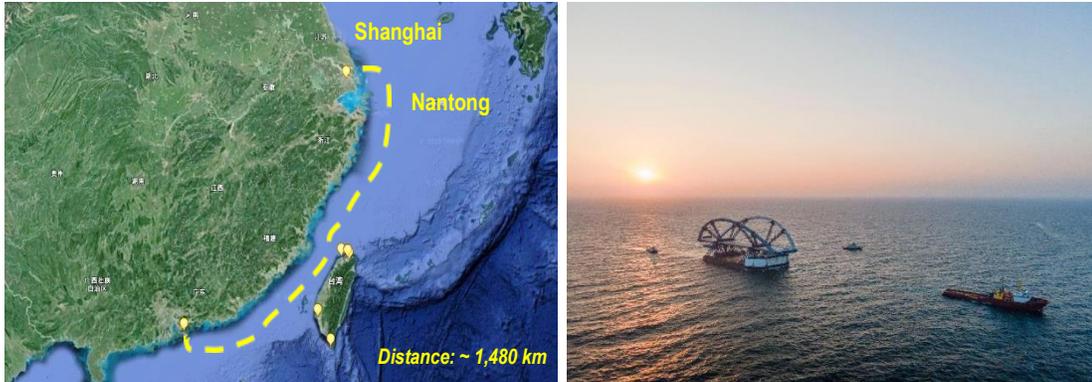


图 10： 从南通到香港的海路航程（中国路桥提供）

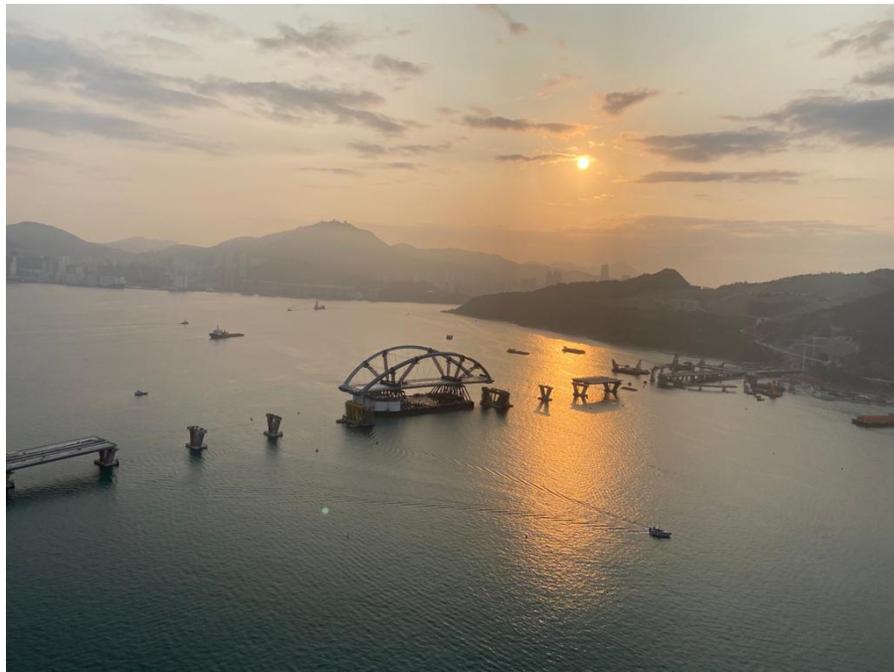


图 11： 钢桥抵达香港

### 使用 S690 高强钢的优势:

与使用 S355 普通钢相比，S690 高强钢的采用使这座钢桥的结构自重减少约 4,400 吨。除了直接节省钢材之外，还节省了钢结构建造的时间和成本。此外，间接效益包括减少了 20% 至 30% 的地基荷载，并因此进一步节省了桥墩和地基的材料和施工成本。

更有趣的是，优势并不仅限于此。通过采用 S690 高强钢，这座钢桥的总重量成功地从 14,400 吨减少到 10,000 吨。从而可以将已经组装完成的整座钢桥从上海通过海上拖运至香港，高效的完成长达 900 海里的远距离海上拖运。藉着适当的驳船，整座钢桥在 8 天之内运抵香港，然后在现场安全和顺畅地被安置到预先安装的预制桥墩上。

### 香港钢构中心的贡献:

藉着和中国路桥的技术合作，香港钢构中心为 S690 高强钢的广泛应用做出了以下贡献:

- 提供科学理论、实验结果和工程数据，以供设计工程师和施工单位接纳 S690 高强钢材钢构；
- 评估钢构加工商提出的焊接工艺，焊接方案，以及焊接工艺和参数；
- 对 S690 高强钢的焊接质量和结构性能进行以下检测和评定：
  - i) 检测焊接过程中的温度和热能量输入，
  - ii) 测量残余应力并检查焊接构件的微观结构变化，以及
  - iii) 对焊接部分进行结构试验，以确定机械性能有否折减。

这项技术合作为 S690 高强钢的广泛使用创造了重要的工程应用基础，使其成为高成本效益的建筑技术，可以在香港和世界各地大大发展。

### 使用 S690 高强钢建造钢桥的工程成就：

- a) 这座钢桥的建造打破了多项香港以至中国建造业的纪录，它是首个使用 S690 高强钢建造跨度为 200 米的跨海双钢拱桥，完成全部预制后，将其拖曳至海上，经过 900 海里的航行之后再行安装。该座钢桥使用了 4,400 吨 S690 高强钢，从而可使钢桥的总重量减少 4,400 吨，即从 14,400 吨降低到 10,000 吨。因此，钢桥的总重量减少了约 30%，这使得整个施工方法（包括建造，运输和安装方法）高度可行和安全。因此，这种创新的工程解决方案使钢桥的交付得以完成，同时大大节省了建造成本和建造时间。
- b) 这座钢桥是由香港一家国际知名的桥梁设计咨询公司按照欧盟标准设计，同时由一家中国龙头承建商建造施工，并且由一家高质量的中国钢构制造商使用优质国产钢材制造。这座钢桥的建造和施工均成功证明其完全达到了土木工程拓展署基于国际建筑工程项目守则所制定的建筑标准和规范。这座钢桥成功地展现出中国钢结构建筑业如何使用符合国际标准的优质国产 S690 高强钢交付高质量的钢结构项目。
- c) 这个项目充分表明，通过共同努力，香港能够将自身建立成为国际基建设计中心，同时推动中国成为国际基建建造中心。高强钢结构为香港和中国内地提供了一个偌大的机遇，将其建筑材料和钢结构设计和建造专业服务出口到国际建筑市场。

项目评价：

香港钢构中心：

将军澳跨湾连接桥项目是香港与中国建筑业依照国际标准，有效应用国产优质 S690 高强钢进行设计和建造的桥梁和建筑的重要一步。基于先进结构工程和现代钢结构前沿技术的最新发展，香港钢构中心能够促进 S690 高强钢在香港以及海外建筑项目的广泛应用。

AECOM：

在桥梁结构中采用国产优质 S690 高强钢，是中国以至全世界桥梁工程中的一项重大技术进步。香港钢构中心的研发工作使 S690 高强钢在该技术领域的发展提前了 5 至 8 年。有赖于 S690 高强钢的应用，我们目前正在世界各地开展类似的创新工程应用的多座桥梁设计！



图 12： 钢桥被安放于预制桥墩上

中国路桥：

只有通过使用国产优质 S690 高强钢才能实现这座双钢拱钢桥的建造，并且它使许多设计方案和施工过程变得既可行又合理！在经历了这个独一无二的项目后，我们体验到这些 S690 高强钢所提供的**结构和成本优势**，我们预计还会有更多使用 S690 高强钢的桥梁和建筑。

香港特别行政区政府土木工程拓展署：

我们为这座双钢拱钢桥的设计和施工取得了巨大的成功感到高兴，这座钢桥充分利用了 **S690 高强钢** 的优势，能够以**较低的成本提供较大的承载能力**。我们相信，这种创新的建筑材料将会在类似的项目中得到采用。

## 钟国辉 教授

国家钢结构工程技术研究中心香港分中心主任  
土木及环境工程学系 教授  
土木及环境工程学系 副系主任 (2013 / 2019)  
香港理工大学



香港建造业议会 领导层成员  
香港建筑金属结构协会 会长  
香港工程师学会 会员

英国谢菲尔德大学 学士  
英国伦敦帝国理工学院 博士  
英国钢结构工程研究院 研发工程师 (1989 / 1995)

中国钢结构协会 第八届理事会 特邀常务理事  
中国钢结构协会 专家组委员  
中国建筑金属结构协会 专家组委员

英国结构工程师学会 副会长 (2017 - 2020)  
英国结构工程师学会 监事会 委员 (2013 - 2015)

国际期刊《结构工程的先进发展》主编 (2008 - 2010)

**艾奕康**有限公司 (**AECOM**) 于 1990 年成立，是世界知名的基础设施综合服务企业，从规划、设计、工程到咨询和施工管理，提供项目各阶段的专业服务。财富 500 强 (Fortune 500) 中名列第 163 位，于纽约证券交易所上市。艾奕康主要业务范围包括以下专业领域：能源、环境、建筑设计、建筑工程、施工服务、规划设计、经济规划、政府服务、矿业、石油和天然气、专案管理、工程造价咨询、交通运输、水务。

**艾奕康**业务遍及全球 150 多个国家，有 56,000 名员工，包括工程师、环境专家、经济学家、科学家、规划师、建筑师、景观建筑师、顾问及专案、成本管理和专案经理群在内的团队。在大中华区，艾奕康在香港、台北、上海、北京、深圳、广州及成都等 10 多个城市建立了办公室，员工总人数超过 6,500 名。

**中国路桥**工程有限责任公司（中国路桥 **CRBC**）于 1979 年在中华人民共和国正式组建，是中国最早进入国际工程承包市场的四家大型国有企业之一，从事全范围的基础建设工设计、施工、管理及投资业务，在亚洲、非洲、欧洲、美洲 50 多个国家和地区设立了分支机构。2005 年中国路桥成为重组后的中国交通建设股份有限公司（中国交建）的全资子公司，作为中国交建主要的海外业务承担者之一，承接了大量的技术领先的国际知名工程。

中国路桥 1988 年进入香港市场，2002 年进入澳门市场，多年来承接了过百项工程，并依托港澳，开拓了大量的中国大陆及港澳地区的基建投资专案。

**土木工程拓展署 (CEDD)** 是香港特别行政区政府发展局的一个工程部门。其工作范畴包括全港各个地区的土地及基础建设、港口及海事工程、岩土工程与环境及可持续发展。常规编制共有员工约 2,000 人，大约有三分之二是专业和技术人员，包括土木工程师、土力工程师、测量师和园境师。

