

# 双钢板-混凝土组合结构在沉管隧道中的发展与应用

宋神友<sup>1</sup> 聂建国<sup>2,3</sup> 徐国平<sup>4</sup> 樊健生<sup>2,3</sup> 唐亮<sup>4</sup> 郭宇韬<sup>2,3</sup>

(1. 深中通道管理中心, 广东广州 510600; 2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;  
3. 北京市钢与混凝土组合结构工程技术研究中心, 北京 100084; 4. 中国公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 沉管隧道在近年来修建的大型水下隧道工程中越来越多地得到运用, 尤其是大型海底隧道。为研究沉管隧道的发展趋势, 为工程设计提供参考, 文中综述了沉管隧道的历史, 总结出其结构形式经历了钢壳-钢筋混凝土结构、钢筋混凝土结构、双钢板-混凝土组合结构 3 个发展阶段。研究发现以配置纵向隔板与加劲肋为特征的隔舱式双钢板-混凝土组合结构优点突出, 是未来大型沉管隧道的发展方向, 值得深化研究与探讨。目前双钢板-混凝土组合结构的相关研究较多, 但针对隔舱式双钢板-混凝土组合结构面外性能的研究还比较欠缺, 已有设计方法应用了混凝土规范但较为保守。在已有研究的基础上, 该文进行 3 个抗弯梁式试验与 3 个抗剪梁式试验。试验研究发现已有抗弯设计方法与试验结果符合较好, 但其考虑受压翼缘局部屈曲的构造要求可进一步放宽; 已有抗剪设计方法低于试验值较多, 偏于保守。基于理论分析, 文中进一步提出考虑钢-混凝土组合抗剪机制与工字钢腹板抗剪机制两种机制相结合的抗剪设计方法, 与试验结果符合较好且有一定富余。

**关键词:** 双钢板-混凝土组合结构; 沉管隧道; 巨型结构; 面外性能; 抗弯承载力; 抗剪承载力

**中图分类号:** U451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)04-0109-12

## Development and application of steel-concrete-steel composite structures in immersed tunnels

Song Shenyou<sup>1</sup> Nie Jianguo<sup>2,3</sup> Xu Guoping<sup>4</sup> Fan Jiansheng<sup>2,3</sup> Tang Liang<sup>4</sup> Guo Yutao<sup>2,3</sup>

(1. Administration of Shenzhen-Zhongshan Passage, Guangzhou 510600, China;

2. Key Lab of Civil Engineering Safety and Durability of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Steel and Concrete Composite Structures, Beijing 100084, China;

4. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** Immersed tunnels have been increasingly applied to large-scale submerged tunnel projects in recent years, especially for the large-scale submarine tunnels. To study the development trend of the immersed tunnels and offer guidance for engineering design, the history of the immersed tunnels is reviewed and summarized into three stages, namely, steel shell-reinforced concrete structure, reinforced concrete structure, and steel-concrete-steel composite structure. It is found that the compartment steel-concrete-steel (CSCS) composite structures, which are characterized by longitudinal and transverse diaphragms and stiffening ribs, shall be superior to traditional structural forms, and may become a development trend of large-scale immersed tunnels in the future, which is worth being studied and discussed further. Although many researches have focused on steel-concrete-steel composite structures, the investigations on revealing the mechanisms of the out-of-plane performances of CSCS composite structures are still absent, and moreover, current design methods in the concrete code are relatively conservative. Based on the previous studies, 3 beam bending tests and 3 beam shear tests are conducted. Experimental results disclose that current bending design method may lead to good agreements with the experiments, but the restrictions on the spacing of ribs can be relaxed further considering the

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(51725803)

作者简介: 宋神友, 学士, 教授级高级工程师

通讯作者: 郭宇韬, 博士研究生

收稿日期: 2018-03-02

constitution requirements on local buckling of flange. However, current shear design method may often result in lower values than the experimental results, and hence the design is relative conservative. Based on theoretical analysis, a shear design method considering the combination of the anti-shear mechanisms of steel-concrete composite truss and steel web is proposed, which agrees well with the test results with a certain margin.

**Keywords:** steel-concrete-steel composite structure; immersed tunnel; mega structure; out-of-plane performance; bending capacity; shear capacity

**E-mail:** guoyutao11@foxmail.com

## 引 言

在跨越江河湖海的建筑物中,桥梁与水下隧道是两种主要的结构形式。其中,由于具有气候/海况依赖程度低、不影响通航、环境改变小、线路短、抗震性能好等优点,水下隧道常被应用于大型跨海或跨江工程<sup>[1]</sup>。水下隧道有几种常用的修建方法,如围堰明挖法、钻爆法、盾构法、沉管法<sup>[2]</sup>。其中,沉管法,也称沉埋管节法或预制管节沉放法,施工时通常在干船坞内或大型驳船上先预制钢筋混凝土管节或全钢管节,然后浮运到指定的水域,再下水沉埋到设计位置固定,最终建成需要的过江隧道或大型水下空间<sup>[3]</sup>。相比于其他方法,沉管法由于有结构形状限制小、河床/海床适应能力强、可预制、防水性能好、施工方便快捷等优点,越来越多地得到采用,逐渐成为了大型水下隧道工程的首选方案<sup>[4]</sup>。据统计,世界各地已有 20 多个国家采用沉管隧道技术修建了 150 多条水下隧道,目前,我国大陆地区已修建或者在建的也有 10 余条沉管隧道<sup>[5-6]</sup>。

双钢板-混凝土组合结构是一种在双面钢板间充填混凝土,并通过焊在钢板上的栓钉、槽钢、钢筋等形式的连接件将钢板与混凝土组合成整体而共同受力的结构形式<sup>[7]</sup>,在国外被称为 SCS 组合结构 (steel-concrete-steel composite structure) 或 DCS 组合结构 (double skin composite structure),在国内也时常被称为钢板夹心混凝土组合结构。双钢板-混凝土组合结构中一般不配置钢筋,钢板承担主要的拉应力并为包裹其中的混凝土提供约束作用,同时兼做混凝土浇筑时的模板,还能够提供抗渗、抗裂作用;混凝土承担主要的压应力并且对钢板提供支撑作用以防止钢板的局部屈曲;连接件主要用于传递钢板与混凝土之间的界面剪力,并具有较强的抗拔作用,能够提高钢板的稳定性。由于双钢板-混凝土组合结构在施工上的便捷性以及其表现出来的良好的承载力、延性、抗冲击性能、抗爆炸性能、防

水性能,该结构被越来越来多地运用到海洋结构、核结构、防护结构以及隧道结构中<sup>[8-10]</sup>。

20 世纪 80 年代以来,双钢板-混凝土组合结构开始应用于沉管隧道<sup>[11]</sup>。与传统的钢筋混凝土方案相比,双钢板-混凝土组合结构具有承载能力高、防水性能好、预制厂地要求低、施工速度快等显著优点,更加适用于大型沉管隧道。本文综述了沉管隧道与双钢板-混凝土组合结构的发展历史,总结了双钢板-混凝土组合结构在沉管隧道中的发展、应用、相关研究及设计方法。在以往研究与工程实践的基础上,本文进行了 6 个沉管隧道双钢板-混凝土组合结构大比例缩尺试验,包括 3 个抗弯试验与 3 个抗剪试验,基于试验结果对比了已有方法并提出了改进建议。

## 1 沉管隧道结构形式的发展

沉管隧道源于美国,兴盛于欧洲与日本<sup>[12]</sup>,1910 年美国便修建了世界上第一条用于交通的沉管隧道。沉管隧道的管节结构大致可分为钢筋混凝土与钢板混凝土两类。这两类沉管隧道在国际上均有不少应用,历史上美国是以钢板混凝土结构为主,欧洲是以钢筋混凝土结构为主,日本则兼而有之。沉管隧道在中国的发展起步较晚,其起源地在中国香港,20 世纪 70 年代开始修建第一条沉管隧道,中国大陆的第一条沉管隧道则要到 20 世纪 90 年代<sup>[13]</sup>。沉管隧道选择何种形式,主要取决于地区习惯及经验、施工设备、材料供给、工程地质条件、水深条件、作用荷载等因素。由于钢板管节的建造可以依托于船舶制造技术,而美国和日本的造船业较先进,钢板混凝土沉管隧道在这两个国家的应用较为普遍。日本由于国土面积狭小,隧址附近能用于建造干坞的场地有限,采用钢板管节可以在浮运后、沉放前浇筑混凝土,节省施工占地,具有较大优势。在荷兰等西欧国家修建水下隧道时,一般采用钢筋混凝土管节,荷兰等国家在混凝土作业时一

贯坚持高标准，从混凝土原材料的组成、降低温差、收缩补强、模板选择上都采取相应的措施，从而使钢筋混凝土结构能够达到水下隧道的相关要求<sup>[14]</sup>。

世界上第一条用于交通的沉管隧道是 1910 年美国的 Detroit River Railway 隧道，其使用的便是钢板混凝土结构<sup>[15]</sup>。如图 1 所示，早期的钢板混凝土沉管隧道采用双钢板或者单钢板，结合内侧的钢筋混凝土部分形成整体结构，其外钢板一般较薄，主要用作防水与充当混凝土浇筑时的模板，参与结构受力较少，而钢筋混凝土部分才是运营阶段的主要受力结构<sup>[16]</sup>。这种状态下的钢板混凝土结构由于钢与混凝土间并无有效的抗剪连接件，无法形成组合作用，设计时只考虑钢结构与钢筋混凝土结构的分别作用，因此还不能被称作钢板-混凝土组合结构。后来的设计中，钢与混凝土界面开始逐渐加入如 J 型钩等形式的连接件来加强钢板与钢筋混凝土的连接，钢板与钢筋混凝土之间也开始考虑组合作用，但此时的钢板-钢筋混凝土组合结构与本文所指的双钢板-混凝土组合结构还有较大的区别，其结构的受力主体仍为钢筋混凝土，钢板更多地是起到防水和充当混凝土模板作用，其厚度一般较薄。这种以钢筋混凝土为主要受力体系，钢板起到类似于“壳”作用的沉管隧道结构，一般被称作钢壳（steel-shell）-钢筋混凝土结构，简称钢壳沉管隧道结构或钢壳混凝土沉管隧道结构。由于施工与结构受力的需要，钢壳沉管隧道一般做成圆筒状，常见的有单筒或者双筒两种形式。钢壳沉管隧道一般在工厂预制管节，浮运到现场进行混凝土浇筑再沉放管节，也有先压重沉放钢结构再水下灌注混凝土的施工方法。

从 1910 年到 1930 年，钢壳沉管隧道一直为世界上沉管隧道的主要形式。1930 年，荷兰 Maas Tunnel 首次提出了矩形截面的多箱式钢筋混凝土沉管隧道（如图 2 所示），该结构在预制场分作几个部分预制。此后，此种形式的沉管隧道长期以来都是欧洲相关工程的首选方案<sup>[12]</sup>。

钢壳沉管隧道与钢筋混凝土沉管隧道在长时间内都是世界各地沉管隧道工程的主要方案。直到 20 世纪 80 年代，以不配置钢筋为特点的双钢板-混凝土组合结构开始被提出并运用在沉管隧道中。

1986 年，英国 Tomlinson 公司在威尔士跨 Conwy 河沉管隧道项目中提出了重叠栓钉式的双钢板-混凝土组合结构形式。如图 3 所示，这种结构在两层钢板上分别焊接长栓钉，长栓钉交错排列，进行互不接触地搭接，钢板中进一步填充混凝土以形

成最终的结构。实践中发现，这种结构形式施工困难，不便操作，很难保证两块钢板之间的精确距离，而且逐个焊接栓钉将花费大量的时间和人力。因此，该方案最终并未被 Conwy 河沉管隧道项目所采用，但其优点还是被认可的<sup>[17]</sup>。鉴于此结构具有的优越性能与潜力，欧洲煤钢共同体（ECSC）从 1990 年至 1997 年开始对该结构性能研究给予了持续支持，

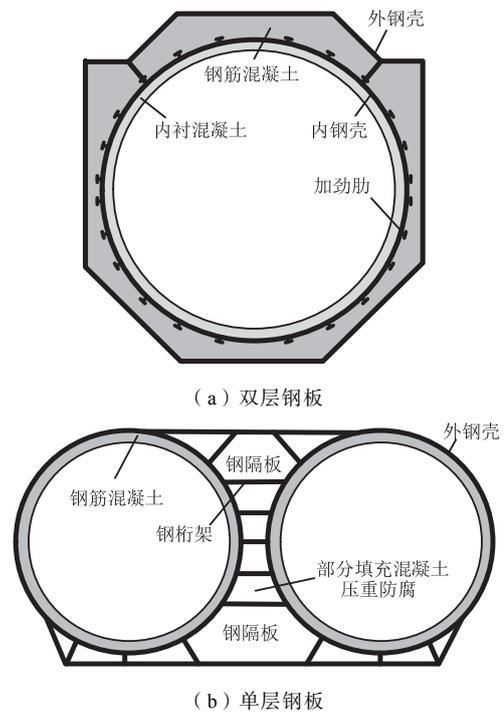


图 1 圆筒状钢壳沉管隧道

Fig.1 Circular steel shell immersed tunnel

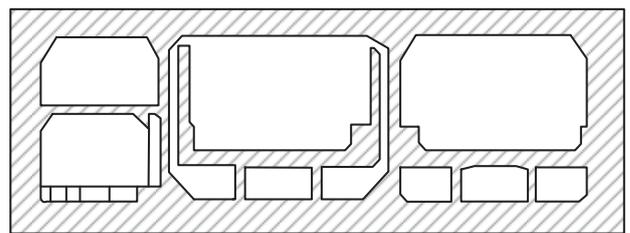


图 2 矩形钢筋混凝土沉管隧道

Fig.2 Rectangular reinforced concrete immersed tunnel

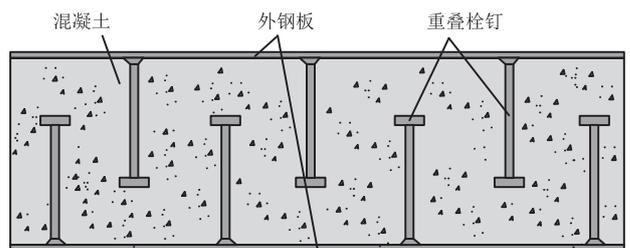


图 3 重叠栓钉式双钢板-混凝土组合结构

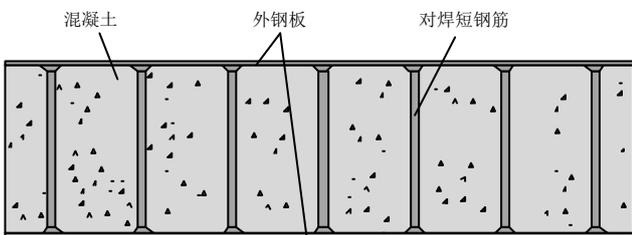
Fig.3 Overlapped headed studs SCS composite structure

主要研究工作由威尔士 Cardiff 大学承担完成<sup>[18-19]</sup>。在此基础上,英国钢结构协会于 1994 年制定了双钢板-混凝土组合结构的设计规范<sup>[20]</sup>。

为了简化栓钉的焊接工作,如图 4 所示,英国 Corus 公司在 1998 年提出了一种新型双钢板-混凝土组合结构 (Bi-steel)<sup>[21]</sup>,它采用横向短钢筋代替栓钉作为抗剪连接件,利用旋转摩擦施焊技术,将短钢筋两端分别与两侧钢板相连。双钢板在工厂中可以预先定位成型,方便运输和混凝土的浇筑。Bi-steel 的焊接可以通过专业设备高效完成,从而简化了工艺,有利于节约时间成本。不过,由于受到焊接机器的限制,该结构的模块尺寸存在一定的局限<sup>[22]</sup>。近年来,这种以对焊短钢筋为连接件的 Bi-steel 组合结构在国内外得到了较多的关注和研究,已广泛应用于核安全壳、高层建筑剪力墙、防爆工程等领域,并且也已经出版相应的规范<sup>[23]</sup>。然而,目前仍未见到其应用于水下隧道中的报道,主要原因是受专用制造设备能力所限,结构厚度不得超过 700mm,钢板厚度不得大于 20mm,这种结构尺寸对大型沉管隧道是远远不够的<sup>[22]</sup>。



(a) 制造装置

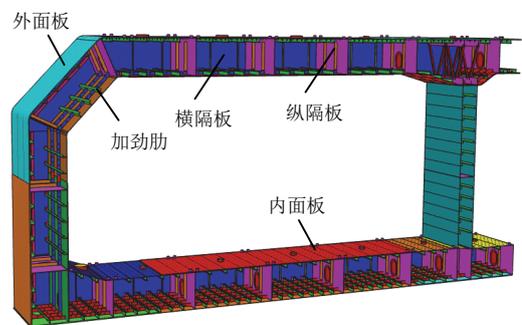


(b) 结构细节

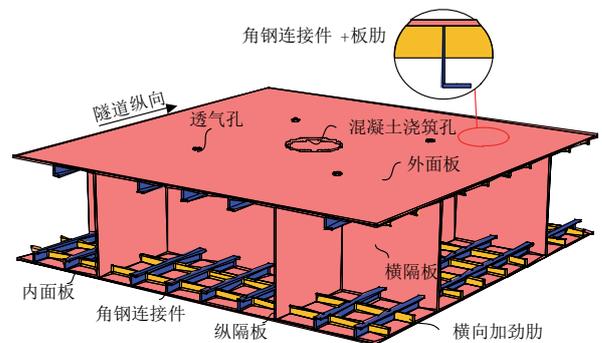
图 4 Bi-steel 双钢板-混凝土组合结构  
Fig.4 Bi-steel SCS composite structure

几乎在英国威尔士跨 Conwy 河沉管隧道中重叠栓钉式双钢板-混凝土组合结构被提出的同时,1988 年,如图 5 所示,日本发展了一种由钢壳、隔

板、肋板和内填充混凝土组成的隔舱式双钢板-混凝土组合沉管结构<sup>[24]</sup>,随着高流动自密实混凝土技术的发展,该结构在日本得到了应用,先后建成了神户港港岛隧道(1999 年)、那霸隧道(2011 年)及新若户隧道(2012 年)<sup>[25-27]</sup>。由图 5 可见,该结构设置纵横隔板,钢板沿管道轴向设置角钢加劲肋,沿横向设置扁钢加劲肋。在施工期,纵横隔板将内外面板连成整体,角钢对面板起到加劲作用;在运营期,纵横隔板与内外面板协同参与结构受力,角钢作为连接件保证钢与混凝土共同工作。钢结构各组成部件在施工期和运营期均充分发挥了材料性能,最大程度上节约了成本,方便了施工。相比于以往的钢壳-钢筋混凝土结构,这种组合沉管结构以钢板为主要的受拉构件,去除了钢筋,大大简化了施工,其用钢量总体上更少。相比钢筋混凝土沉管结构,这种组合沉管结构具有以下特点:①混凝土及钢材用量减少,可节约成本;②隔舱中的混凝土可以现场浇筑,实现钢结构制作与混凝土浇筑场地分离,选址更加灵活,有利于降低预制场成本;③研制中~高流动性、自密实混凝土,可大大降低现场的施工难度;④钢板外包方式可大大提高管节的防水性能;⑤混凝土浇筑时无需模板安装拆除作业,管节预制工期大大缩短。



(a) 整体结构



(b) 具体构造

图 5 隔舱式双钢板-混凝土组合结构  
Fig.5 CSCS composite structure

依托神户港港岛隧道的建设,日本对隔舱式双钢板-混凝土组合结构的受力性能、设计方法、构造要求、高流动自密实混凝土配置方法、沉管预制工艺等开展了系列研究,于 1992 年颁布了《鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)》<sup>[28]</sup>。

综上所述,这种隔舱式双钢板-混凝土组合结构相对于钢筋混凝土结构规模更小,承载能力更强,不均匀沉降更小,抗震适应性更好。外钢板既可作为施工期混凝土浇筑的模板,也可在运营期起到承载与防水的双重作用,确保隧道使用的安全可靠。除此以外,隔舱式双钢板-混凝土组合结构也很好解决了以往钢壳沉管隧道、重叠栓钉式双钢板-混凝土组合结构施工困难、造价高, Bi-steel 双钢板-混凝土组合结构尺寸受限制的问题。隔舱式双钢板-混凝土组合结构在日本沉管隧道实际工程中已得到应用,也是双钢板-混凝土组合结构在未来巨型沉管隧道中的发展方向。

## 2 双钢板-混凝土组合结构相关研究

双钢板-混凝土组合结构的研究有两个分支,一是墙式构件,一般用于建筑结构剪力墙,主要关注其面内性能;一是梁式构件,一般用于海洋结构、防护结构、隧道结构等,主要关注其面外性能。本文主要综述与隧道结构相关的梁式双钢板-混凝土组合结构的发展。

20 世纪 70 年代,没有界面连接措施和以环氧树脂为界面连接措施的双钢板-混凝土结构被先后提出并进行了试验研究,研究发现这种类型的结构由于两层钢板间没有有效的连接(相当于混凝土中没有腹筋),表现出很弱的抗剪能力,其剪切承载力相当于无腹筋混凝土梁<sup>[29-30]</sup>。如前文所述,20 世纪 80 年代,重叠栓钉式、Bi-steel、隔舱式双钢板-混凝土组合结构在欧洲和日本被先后提出,学者们进行了相关研究并出版了相应规范,但此时的研究尚不深入,相应规范基本为混凝土规范的应用。

近年来,随着海洋结构、核结构、防护结构以及隧道结构的进一步发展,国内外开始有更多双钢板-混凝土组合结构相关研究的报道<sup>[30-40]</sup>。双钢板-混凝土组合板在承受弯矩时可能会发生受拉钢板屈服破坏、钢板剪切破坏和混凝土剪切破坏。试验分析表明,受拉钢板屈服破坏是延性破坏,在设计受弯构件时需要保证结构以此种形式破坏,避免其他脆性破坏模式的出现<sup>[31]</sup>。在受弯的工况下,不同的

连接件将会展现出不同的性能,所有的连接件都能够展示出一定的组合效应,连接件抗拔出能力较弱的构件在受弯过程中容易发生局部翘曲从而破坏,研究表明 J 型连接件能够提供较高的承载能力,同时具有一定的刚度和延性<sup>[32]</sup>。

当剪跨比较小或受拉钢板较厚时,试验中双钢板-混凝土组合结构发生剪切破坏;根据是否发生剪切破坏,承载结构可以分为深梁和细梁;发生受剪破坏时,混凝土剪切裂缝末端的钢板首先破坏<sup>[33]</sup>。如果剪力连接充分,那么在主剪切裂缝旁会继续发展剪切裂缝,方向与主剪切裂缝平行;如果剪力连接不充分,结构将发生滑移破坏<sup>[34]</sup>。双钢板-混凝土组合结构深梁的抗剪能力往往较高,该类结构的破坏形式一般为拉压杆破坏;其抗剪能力与钢板厚度和连接件的抗剪能力有非常大的关系,还要考虑混凝土开裂后传力路径的改变;小剪跨时混凝土可以简化为加载点到支撑点的斜支柱;上下钢板除了承受拉压力以外,还要承受销栓剪力,钢板的薄膜效应同样可以提高结构的抗剪能力<sup>[35]</sup>。弧型双钢板-混凝土组合结构的破坏机理为剪切破坏,改变曲率、厚度、剪力连接件间距等会对结构的承载能力造成明显影响<sup>[36]</sup>。

承受冲切时,双钢板-混凝土组合结构承载力与混凝土的力学性能、钢板的厚度等因素相关<sup>[37]</sup>。在爆炸荷载下,结构多发生弯曲破坏,与普通加劲板相比,双钢板-混凝土组合结构表现出更好的性能;试验研究发现,钢板的厚度对结构承受爆炸荷载的能力有非常大的影响<sup>[38]</sup>。双钢板-混凝土组合结构有一定的抗疲劳能力,研究表明,其抗疲劳性能与应力幅和最大应力同等相关<sup>[39]</sup>。

我国已有的对双钢板-混凝土组合结构面外性能的研究主要集中在核电工程领域,结构中一般不设置内外钢板间的连接措施。研究发现,当双钢板-混凝土组合板按完全抗剪连接设计时,钢板与混凝土共同变形,协同工作,最终的破坏形态为弯曲破坏或弯剪破坏;当弯曲破坏时,与钢筋混凝土适筋梁类似,延性较好;当弯剪破坏时,由于加载点附近的弯距剪力均较大,而板内没有配置抗剪箍筋,因此,随着荷载的上升,混凝土发生斜拉破坏,延性较差;采用部分抗剪连接设计时,低荷载下即会出现连接件被剪断,混凝土迅速开裂破坏的现象;当受压钢板栓钉间距过大时,发生钢板局部屈曲破坏<sup>[8,40]</sup>。不设置内外钢板间的连接措施的双钢板-混凝土组合结构面外受力时由于出现混凝土斜向裂

缝,呈典型的脆性破坏,延性较差,但极限承载力较高;适当增加轴力能有效提高混凝土抗裂性能;增加外钢板厚度和混凝土强度对混凝土抗裂性能提升不明显<sup>[41]</sup>。

总结以上研究,可见双钢板-混凝土组合机构在不设置连接内外钢板的措施时(如对焊钢筋、J型钩、钢隔板),结构的抗剪、抗冲击、抗爆能力较差,由混凝土开裂产生脆性破坏;当设置连接内外钢板的措施时,结构呈现出良好的性能,其抗剪、抗冲击、抗爆性能等显著提升。此外,设计中要注意保证完全抗剪连接和适当的连接件间距,以避免界面破坏和钢板局部屈曲破坏。目前,适用于巨型水下隧道的隔舱式双钢板-混凝土组合机构的相关研究还较少,只有日本有少量的文献报道。

### 3 已有设计方法

本文对设计方法的综述将主要针对适用于巨型沉管隧道的隔舱式双钢板-混凝土组合结构展开,主要参考文献<sup>[28]</sup>《鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)》(简称《指針(案)》)。隔舱式双钢板-混凝土组合结构具体形式如图5所示,其相应结构细节已在上文中描述。

对于抗弯设计,《指針(案)》建议参考钢筋混凝土构件按照塑性理论进行计算,日本钢筋混凝土规范<sup>[42]</sup>中的抗弯设计与我国混凝土规范<sup>[43]</sup>类似,这里不再赘述。除此以外,《指針(案)》还建议考虑以下两点。

一是受压钢板局部屈曲的影响,考虑局部屈曲后的受压钢板抗压强度设计值应通过式(1)计算:

$$f_{yd}' = \frac{t_f}{b} \sqrt{E_s f_y'} \quad (1)$$

式中: $f_{yd}'$ 为考虑局部屈曲后的受压钢板设计强度; $t_f$ 为受压钢板厚度; $b$ 为受压钢板沿受力方向布置的加劲肋间距; $E_s$ 为钢板的弹性模量; $f_y'$ 为钢板的原抗压设计强度。经本文试算,该式与我国《公路钢结构桥梁设计规范》<sup>[44]</sup>中考虑局部屈曲影响的柔性加劲受压板件折减结果相似。

二是截面剪力对横隔板屈服应力的影响,考虑截面剪力后的横隔板屈服强度设计值为:

$$f_{wyd} = f_{wy} \left(1 - \frac{\sigma_w}{f_{wy}}\right) \quad (2)$$

式中: $f_{wyd}$ 为考虑截面剪力影响的横隔板设计强度;

$f_{wy}$ 为横隔板原设计强度; $\sigma_w$ 为横隔板中由于剪切产生的拉应力。

对于抗剪设计,《指針(案)》分成只有横隔板和只有纵隔板两种情况计算,当同时有纵横隔板时,取两种情况的较大值(不考虑叠加)。

当只有横隔板时,抗剪承载力 $V_{uh}$ 按式(3)~式(6)计算:

$$V_{uh} = \min(V_{uid}, V_{u2d}) \quad (3)$$

$$V_{uid} = f_{vud} B h_c \quad (4)$$

$$V_{u2d} = \sin^2 \alpha_1 (\cot \theta + \cot \alpha_1) t_{w1} z f_y \quad (5)$$

$$f_{vud} = 1.25 f_c'^{1/2} \quad (6)$$

式中: $V_{uid}$ 为抗剪桁架模型中混凝土斜压杆破坏时的承载力; $V_{u2d}$ 为抗剪桁架模型中横隔板斜拉杆屈服时的承载力; $f_{vud}$ 为混凝土受剪斜压破坏强度; $B$ 为构件宽度; $h_c$ 为混凝土高度; $\alpha_1$ 为隔板斜拉杆与构件轴向的夹角,一般取 $60^\circ$ ; $\theta$ 为混凝土斜压杆与构件轴向的夹角,一般取 $30^\circ$ ; $t_{w1}$ 为横隔板厚度; $z$ 为受压中心与受拉钢板中心的距离; $f_y$ 为钢板的屈服强度; $f_c'$ 为混凝土的轴心抗压强度。

当只有纵隔板时,抗剪承载力 $V_{uz}$ 按式(7)和式(8)计算:

$$V_{uz} = \min(V_{uid}, V_{u3d}) \quad (7)$$

$$V_{u3d} = \frac{\sin \alpha_2 (\cot \theta + \cot \alpha_2) A_t f_y z}{s_w} \quad (8)$$

式中: $V_{u3d}$ 为抗剪桁架模型中纵隔板拉杆屈服时的承载力; $\alpha_2$ 为纵隔板与构件轴向的夹角,一般为 $90^\circ$ ; $A_t$ 为纵隔板的面积; $s_w$ 为纵隔板的间距。

《指針(案)》对于隔舱式双钢板-混凝土组合结构的抗剪设计主要依据日本混凝土规范<sup>[42]</sup>,认为横隔板相当于 $60^\circ$ 方向的箍筋,纵隔板相当于 $90^\circ$ 方向的箍筋。《指針(案)》同时表明目前对于双向配置隔板的隔舱式双钢板-混凝土组合结构研究较少,其给出的方法偏于保守。

与日本《指針(案)》类似,欧洲双钢板-混凝土组合结构设计规范也主要参考欧洲混凝土规范 Eurocode 2<sup>[45]</sup>,认为连接内外钢板的拉结钢筋为 $90^\circ$ 的腹筋进行抗剪计算,这里不再赘述。此外,我国出版的《型钢混凝土组合结构技术规程》<sup>[46]</sup>认为型钢混凝土组合结构的抗剪承载力应取钢结构与混凝土结构两部分的叠加,若应用于隔舱式双钢板-混凝土组合结构,横隔板相当于型钢腹板,纵隔板相当于竖向箍筋,此设计方法对抗剪设计有一定

的参考意义。

### 4 试验研究

隔舱式双钢板-混凝土组合结构是未来巨型沉管隧道的发展方向，但其目前有针对性的研究还较少，已有设计方法偏于保守地从混凝土规范得出。为了验证已有设计方法的可靠性，研究隔舱式双钢板-混凝土组合结构构件的抗弯、抗剪承载力，本文进行了 3 个抗弯与 3 个抗剪验证性试验，其尺度按照实际隧道 1 : 2 缩尺, 并进行一定的参数调整以考察不同因素的影响。试验加载装置如图 6 所示，抗弯构件进行 4 点弯曲加载，抗剪构件进行 3 点弯曲加载。试验参数如表 1 所示，所有的梁高均为 800mm，其中构件 W1 为抗弯基本试件；W2 考虑连接件间距对上翼缘局部屈曲的影响；W3 考虑混凝土浇筑有可能产生的脱空的影响，脱空厚度 5mm，沿全长通过低弹模材料 EVA 设置；J1 为抗剪基本试件；J2、J3 分别加厚上下翼缘，以探究抗

弯、抗剪破坏的界限。抗弯构件 W1-W3 的剪跨区横隔板进行了加厚，避免可能产生的剪跨区剪切破坏。构件加工细节如图 7 所示。

表 1 中，混凝土轴心抗压强度根据 150mm×150mm×150mm 标准试块试验，按 0.76 倍试块抗压强度考虑。试验采用同一批钢材，不同厚度钢板材料性质如表 2 所示，钢材的弹性模量约为  $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ，钢材屈服后出现平台段，平台段应变范围约为 0.002~0.02，钢材延性较好，具有较长的强化段。

钢板表面布置了若干应变片。其中抗弯构件上翼缘每区格均布置应变片，以考虑可能存在的局部屈曲；上下翼缘沿构件轴向与横向均布置应变片，以考虑可能存在的应力集中与剪力滞后；腹板沿构件高度方向布置 5 个应变片以考察平截面假定是否成立。抗剪构件上下翼缘沿构件轴向与横向均布置应变片，以考虑可能存在的应力集中与剪力滞后；腹板沿构件高度方向布置 5 个应变片，同时两个角

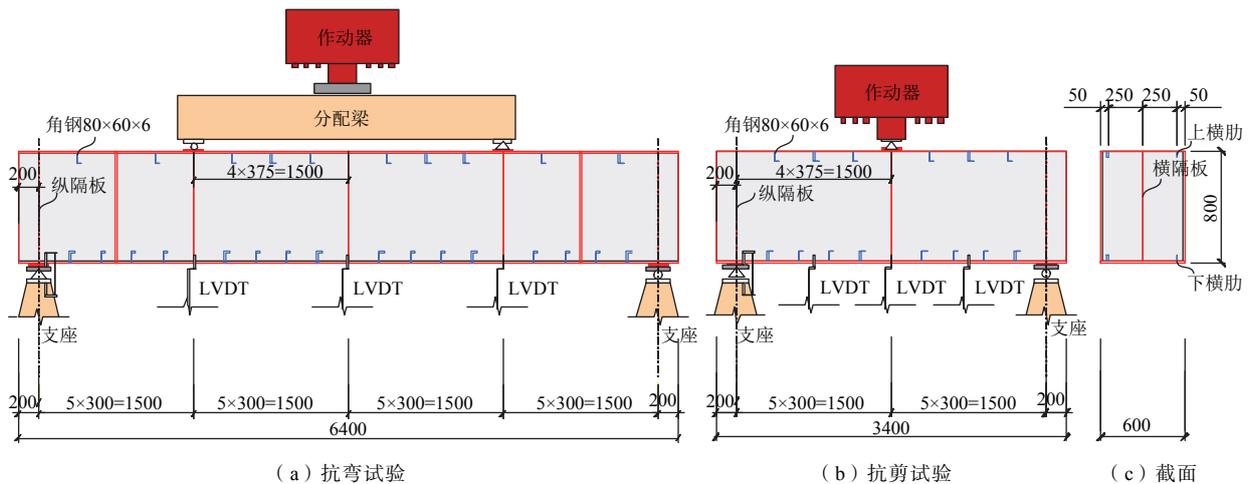


图 6 试验加载装置 (单位: mm)

Fig.6 Arrangement of the test (unit: mm)

表 1 抗弯、抗剪构件参数

Table 1 Parameters of the specimens

类型	编号	研究参数	$l(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$s_1(\text{mm})$	$t_t(\text{mm})$	$t_b(\text{mm})$	$t_{wl}(\text{mm})$	$t_{wt}(\text{mm})$	脱空(mm)	$f'_c(\text{MPa})$
抗弯	W1	基本试件	6000	600	250	6	10	10	6	0	36.8
	W2	横肋间距	6000	600	100	6	10	10	6	0	36.8
	W3	混凝土脱空	6000	600	250	6	10	10	6	5	36.8
抗剪	J1	基本试件	3000	600	300	6	10	10	6	0	36.8
	J2	翼缘厚度	3000	400	300	25	25	10	6	0	36.8
	J3	翼缘厚度	3000	400	100	40	40	10	6	0	36.8

注:  $l$  为构件跨度;  $b$  为构件宽度;  $s_1$  为横向加劲肋间距;  $t_t$  为上翼缘厚度;  $t_b$  为下翼缘厚度;  $t_{wl}$  为横隔板厚度;  $t_{wt}$  为纵隔板厚度;  $f'_c$  为混凝土轴心抗压强度。

表 2 钢材性能

Table 2 Properties of the steel

厚度(mm)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	伸长率(%)
6	401	536	16.70
10	363	494	15.30
25	376	545	22.70
40	305	506	28.70

注:  $f_y$  屈服强度;  $f_u$  为极限强度。

部布置应变花,以考察整个横隔板上剪应力的分布。

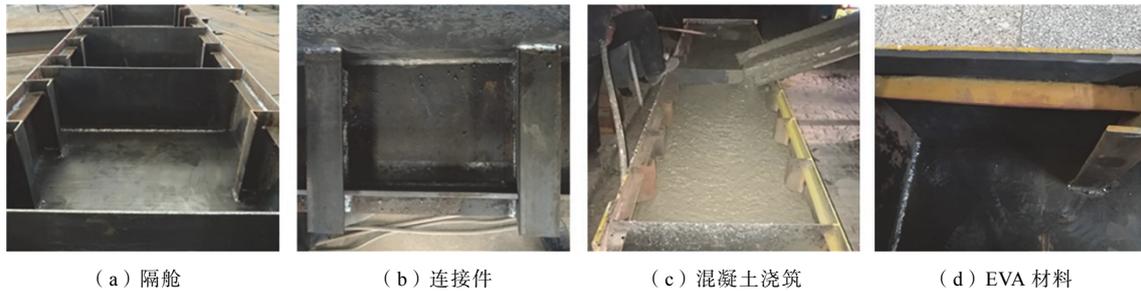


图 7 构件加工细节

Fig.7 Manufacturing details of the specimens

表 3 试验结果

Table 3 Main results of test

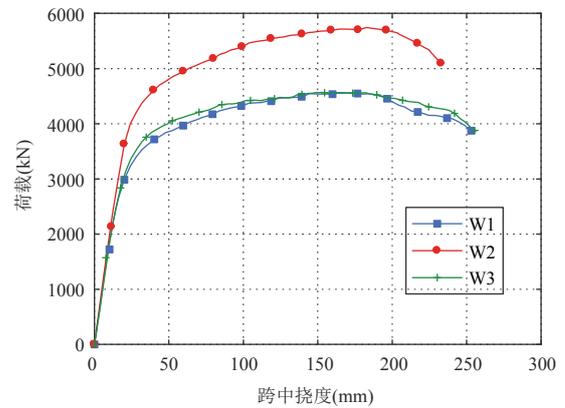
类型	编号	破坏模式	$\delta_y$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)
抗弯	W1	受弯破坏	50.2	3859	171.8	4558
	W2	受弯破坏	55.1	4888	182.8	5747
	W3	受弯破坏	45.7	3958	153.2	4567
抗剪	J1	受弯破坏	21.8	4995	69.9	5899
	J2	弯剪耦合	18.6	6291	34.7	7194
	J3	受剪破坏	17.8	7318	50.6	8249

注:  $\delta_y$  为屈服位移;  $P_y$  为屈服荷载;  $\delta_u$  为峰值位移;  $P_u$  为峰值荷载。

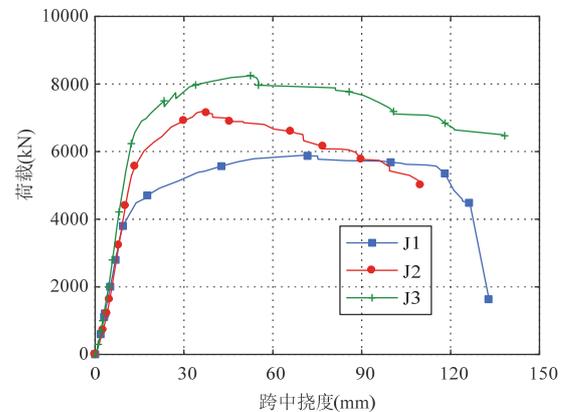
抗弯试验加载过程中,以 W1 为例,荷载 500kN 时纯弯段跨中底部开始出现裂缝并朝构件上部发展; 1500kN 左右时纯弯段底部出现更多裂缝,最大裂缝宽度发展到 0.2mm; 2500kN 左右最大裂缝宽度发展到 0.5mm; 4000kN 左右最大裂缝宽度发展到 1.0mm; 位移接近 50mm 时,有响声发出,可能存在内部的破坏。横向加劲肋间距对构件的抗弯性能有一定影响,加载到 90mm 左右时, W1 上翼缘出现了可见的屈曲,加载到 120mm 时,上部混凝土开始有脱落现象,加载到 180mm 时,上翼缘鼓曲较大,该处混凝土压溃,结构达到极限承载力; 加载到 180mm 左右时, W2 上翼缘出现了可见的屈曲,加载到 200mm 时,屈曲更加明显,屈曲处混

试验过程中,弹性阶段按荷载控制加载,每 200kN 为一级分级加载,加载速度不大于 10kN/s; 接近屈服时改为按位移控制加载,每 2~5mm 为一级分级加载,加载速度不大于 0.5mm/s。加载过程中,通过专用数据采集器每间隔 1s 采集荷载、位移、应变等数据,同时在监视器上实时监测荷载-挠度图像。

汇总的试验结果如表 3 所示,构件的荷载-挠度曲线如图 8 所示,其中,屈服点基于能量原理,根据图形法得出<sup>[47]</sup>。



(a) 抗弯构件



(b) 抗剪构件

图 8 荷载-挠度曲线

Fig.8 Load-deflection curves

凝土压溃，结构达到极限承载力。脱空对构件的抗弯性能基本无影响，W1、W3 均在位移 90mm 左右时出现可见屈曲，之后屈曲发展，构件达到类似的极限承载力。从表 3 可见，抗弯构件均在屈服点后发生局部屈曲且荷载不下降，即按此构造设置的加劲肋可以满足要求。对构件纯弯段的腹板应变进行分析，如图 9 所示，可见其满足平截面假定。

抗剪试验加载过程中，以 J3 为例，800kN 左右在跨中附近出现初始的斜裂缝并随后不断发展，初始收缩裂缝按斜裂缝的模式继续发展，由初始收缩裂缝发展而来的最大斜裂缝宽度达到 0.4mm；1400kN 左右最大斜裂缝宽度达到 0.7mm；2200kN 左右斜裂缝开始沿构件高度方向连通，最大斜裂缝宽度达到 1.0mm；4000kN 左右最大斜裂缝宽度达到 1.4mm，构件内部有响声，可能是由于内部混凝土断裂引起；4000~6000kN 各处裂缝不断发展；7000kN 有混凝土压碎声，外侧混凝土剥落；50mm 结构连接件处裂缝连通出现滑移，部分混凝土挤出，结构抗剪承载力达到极限而开始下降；55mm 有巨

响，可能是内部混凝土破坏。与 J3 不同，J1 出现了弯曲裂缝的发展模式，J2 出现了弯剪耦合的裂缝发展模式，通过试验的应变数据也观察到 J1 的上下翼缘首先屈服，J2 的上下翼缘与腹板几乎同时达到屈服。根据试验现象可见，由于上下翼缘的厚度不同，J1 为受弯破坏，J2 为弯剪耦合破坏，J3 为受剪破坏。典型的破坏形态如图 10 所示。

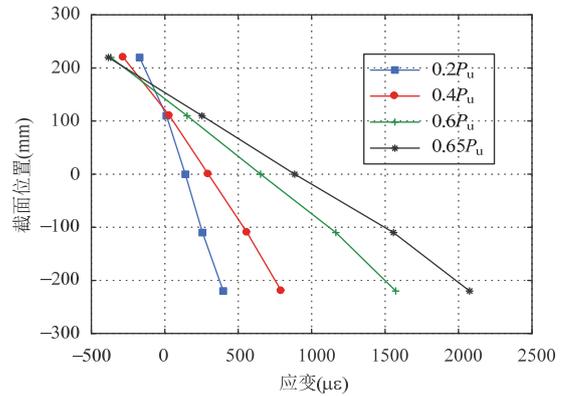
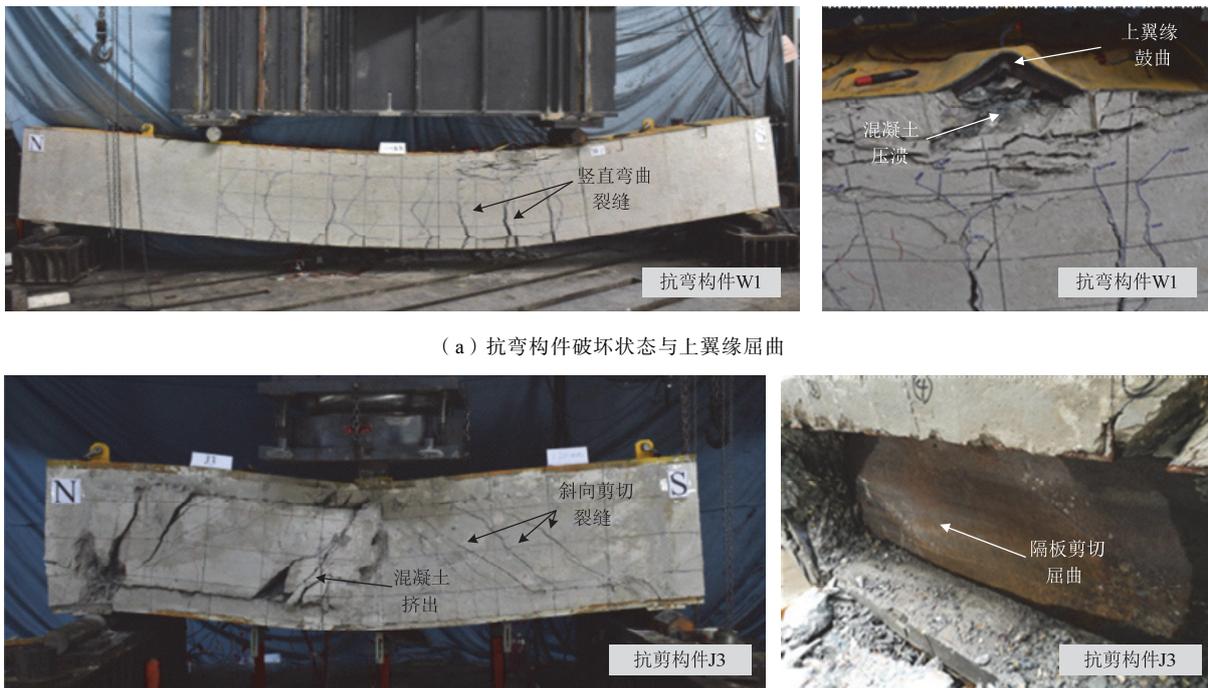


图 9 纯弯段应变 (W1)

Fig.9 Representative strain in bending test (W1)



(a) 抗弯构件破坏状态与上翼缘屈曲

(b) 抗剪构件破坏状态与隔板屈曲

图 10 典型破坏状态

Fig. 10 Typical failure patterns

## 5 设计建议

本文基于已有的设计方法进行了计算，相关结

果如表 4 及表 5 所示，表中试验荷载均取屈服荷载，材料强度均取屈服强度进行计算。

从表 4 中可见，按照日本《指针(案)》、中国《公路钢结构桥梁设计规范》及全截面塑性计算得

到相似的结果, 均与试验值符合良好。前两者的计算值比后者略小, 但差别基本可以忽略, 这说明按照试验设置的加劲肋, 距厚比为  $s_1/t_f=250/6=41.7$ , 可以满足塑性设计条件, 这也与试验中观察到的屈曲晚于屈服, 且屈曲后承载力不下降的现象相一致。

从表 5 中可见, 按照日本《指针(案)》、中国《型钢混凝土组合结构技术规程》计算的抗剪承载力均低于试验值较多, 偏于保守。经分析, 这是由于隔舱式双钢板-混凝土组合结构中的隔板既可以作为钢筋混凝土中的箍筋提供抗剪承载力, 又可以作为工字钢中的腹板提供抗剪承载力, 两部规范均只考虑了这两种作用的其中一部分, 偏于保守。本文建议当横隔板较厚时, 将横隔板分为腹筋作用和腹板作用两部分, 其中腹筋部分同混凝土共同形成组合抗剪桁架提供抗剪承载力, 腹板部分通过纯剪作用提供抗剪承载力。通过对日本《指针(案)》公式进行修正, 建议的抗剪承载力  $V$  按式(9)~式(12)计算:

$$V = V_c + V_s \quad (9)$$

$$V_c = 1.25 f_c^{1/2} B h_c \quad (10)$$

$$V_s = 0.58 \kappa t_{w1} z f_y \quad (11)$$

$$\kappa = 1 - \frac{1.25 f_c^{1/2} b h_c}{\sin^2 \alpha_1 (\cot \theta + \cot \alpha_1) t_{w1} z f_y} \geq 0 \quad (12)$$

式中:  $V_c$  为钢-混凝土组合机制提供的承载力;  $V_s$  为工字钢腹板机制提供的承载力;  $\kappa$  为考虑两种机制共同作用的折减系数; 其他参数同日本《指针(案)》取值相同。表 5 中列出了本文建议公式计算得到的抗剪承载力: 其中 J1 由于翼缘较薄产生受弯破坏(受弯承载力小于受剪承载力), 其破坏荷载低于受剪承载力预测值, 因此表中未给出误差对比; J2 产生弯剪耦合破坏, 理论上其破坏承载力小于受剪承载力; J3 产生受剪破坏, 其破坏承载力等于受剪承载力。总的来说, 本文提出公式与试验符合较好且有一定的富余, 验证了已有设计的安全性与富余度, 但由于试验数较少仍需进行进一步的研究。

表 4 抗弯承载力计算结果

Table 4 Predicted results of bending tests based on theoretical method

编号	破坏模式	试验 (kN)	《指针(案)》		《钢桥规》		全截面塑性	
			计算(kN)	误差(%)	计算(kN)	误差(%)	计算(kN)	误差(%)
W1	受弯破坏	3859	3688	-4.4	3664	-5.0	3805	-1.4
W2	受弯破坏	4888	4243	-13.2	4235	-13.4	4241	-13.2
W3	受弯破坏	3958	3980	0.6	3955	-0.1	4120	4.1

注: 全截面塑性为不考虑局部屈曲, 按照全截面塑性计算的结果。

表 5 抗剪承载力计算结果

Table 5 Predicted results of shear tests based on theoretical method

编号	破坏模式	试验 (kN)	《指针(案)》		《型钢规程》		本文建议	
			计算(kN)	误差(%)	计算(kN)	误差(%)	计算(kN)	误差(%)
J1	受弯破坏	4995	7019	—	4754	—	8393	—
J2	弯剪耦合	6291	4438	-29.4	3663	-41.8	6282	-0.1
J3	受剪破坏	7318	4261	-41.8	3517	-51.9	6031	-17.6

## 6 结论

本文对沉管隧道结构形式的发展、双钢板-混凝土组合结构的发展、双钢板-混凝土组合结构在沉管隧道中的应用进行了综述, 总结了已有设计方法, 进行了隔舱式双钢板-混凝土组合沉管隧道结构的大比例缩尺试验, 基于试验结果和已有设计理论对隔舱式双钢板-混凝土组合结构的设计方法提出了

修正与建议, 主要结论如下:

(1) 沉管隧道经历了从钢壳-钢筋混凝土结构, 到钢筋混凝土结构, 再到双钢板-混凝土组合结构的发展历程。双钢板-混凝土组合结构具有良好的承载力、延性、抗冲击性能、抗爆炸性能、防水性能、施工性能、经济性, 相对于传统结构形式具有较大的优势。

(2) 隔舱式双钢板-混凝土组合结构很好地解决了以往钢壳沉管隧道与重叠栓钉式双钢板-混凝

土组合结构施工困难、造价高, Bi-steel 双钢板-混凝土组合结构尺寸受限制的问题, 已在实际工程中得到应用, 是双钢板-混凝土组合结构在未来沉管隧道中的发展方向。

(3) 国内外学者对双钢板-混凝土组合结构的面外性能进行了大量的研究, 但针对隔舱式双钢板-混凝土组合结构的研究还较少, 已有方法基本上为混凝土规范的应用, 偏于保守。

(4) 进行了6个隔舱式双钢板-混凝土组合结构的梁式试验, 包括3个抗弯试验与3个抗剪试验, 分析了试验现象, 基于试验结果提出了设计建议。

(5) 研究表明, 已有设计方法能较好地预测抗弯承载力, 但对于抗剪承载力的预测偏于保守, 本文提出的考虑不同机制作用的抗剪承载力计算方法与试验符合良好且有一定富余, 可供设计参考, 其内在抗剪机理还需要进一步的研究。

#### 参考文献

- [1] 傅琼阁. 沉管隧道的发展与展望[J]. 中国港湾建设, 2004(5): 53-58 (Fu Qiongg. Development and prospect of immersed tunnels [J]. China Harbour Engineering, 2004(5): 53-58 (in Chinese))
- [2] 张志刚, 刘洪洲. 公路沉管隧道的发展及其关键技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(5): 343-347 (Zhang Zhigang, Liu Hongzhou. Development and key technologies of immersed highway tunnels [J]. Tunnel Construction, 2013, 33(5): 343-347 (in Chinese))
- [3] 陈韶章, 陈越. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2002 (Chen Shaozhang, Chen Yue. Design and construction of immersed tunnel [M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese))
- [4] 杨文武. 沉管隧道工程技术的发展[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 397-404 (Yang Wenwu. Development of immersed tube tunneling technology [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 397-404 (in Chinese))
- [5] 刘言峰. 沉管隧道工程关键技术研究与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017 (Liu Yanfeng. Research and analysis on key technology of immersed tunnel engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese))
- [6] 陈越. 沉管隧道技术应用及发展趋势[J]. 隧道建设, 2017, 37(4): 387-393 (Chen Yue. Application and developing trends of immersed tunnel [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(4): 387-393 (in Chinese))
- [7] Roberts T M, Edwards D N, Narayanan R. Testing and analysis of steel-concrete-steel sandwich beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 38(3): 257-279
- [8] 杨悦. 核工程双钢板-混凝土结构抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015 (Yang Yue. Seismic behavior of double steel-concrete composite structures in nuclear engineering [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese))
- [9] 严加宝, 王哲, Liew J Y R. 双钢板-混凝土组合结构研究进展[C]//第26届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 中国力学学会结构工程专业委员会, 《工程力学》编委会, 2017
- [10] 聂建国, 陶慕轩, 樊健生, 等. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 52-60 (Nie Jianguo, Tao Muxuan, Fan Jiansheng, et al. Research advances of composite shear walls with double steel plates and filled concrete [J]. Building Structure, 2011, 41(12): 52-60 (in Chinese))
- [11] Akimoto K, Hashidate Y, Kitayama H, et al. Immersed tunnels in Japan: recent technological trends[C]//International Symposium on Underwater Technology. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002
- [12] Grantz W C. Steel-shell immersed tunnels-forty years of experience [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1997, 12(1): 23-31
- [13] 马建, 孙守增, 赵文义, 等. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65 (Ma Jian, Sun Shouzeng, Zhao Wenyi, et al. Review on China's tunnel engineering research: 2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 1-65 (in Chinese))
- [14] Glerum A. Developments in immersed tunnelling in Holland [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1995, 10(4): 455-462
- [15] Gursoy A. Immersed steel tube tunnels: an American experience [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1995, 10(4): 439-453
- [16] Bickel J O, Kuesel T R, King E H. Tunnel engineering handbook [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1982
- [17] Tomlinson M, Tomlinson A, Chapman M L, et al. Shell composite construction for shallow draft immersed tube tunnels [C]//Proceedings of the ICE International Conference on Immersed Tube Tunnel Techniques. Manchester, UK: Thomas Telford, 1989
- [18] Wright H D, Oduyemi T O S, Evans H R. The experimental behaviour of double skin composite elements [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, 19(2): 97-110
- [19] Wright H D, Oduyemi T O S, Evans H R. The design of double skin composite elements [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, 19(2): 111-132
- [20] Narayanan R, Roberts T M, Naji F J. Design guide for steel-concrete-steel sandwich construction, Volume 1: general principles and rules for basic elements [M]. Ascot, Berkshire: The Steel Construction Institute, 1994
- [21] Bowerman H, Chapman J C. Bi-steel steel-concrete-steel sandwich construction[C]//Composite Construction in Steel and Concrete IV Conference. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014
- [22] Xie M, Chapman J C. Developments in sandwich construction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(11): 1123-1133
- [23] Bowerman H G, Gough M S, King C M. Bi-Steel design and construction guide [M]. Scunthorpe: British Steel Ltd., 1999
- [24] 松石正克, 岩田節雄. 鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する

- 研究(第 4 報)[J]. 日本造船学会論文集, 1988, 164: 395-405
- [25] 木村秀雄, 小島一雄, 盛高裕生. 沈埋函の海上施工時の函体変形について[J]. トンネル工学研究発表会論文・報告集, 2002, 12: 117-124 (Kimura H, Kojima I, Moritaka H. The study on deformation of immersed tunnel element during production works while afloat[J]. Journal of Tunnel Engineering Report, 2002, 12: 117-124 (in Japanese))
- [26] 玉井昭治, 池田泰敏, 阿部哲良. 海上に浮遊している沈埋函への高流動コンクリートの適用[J]. コンクリート工学, 2003, 41(7): 60-65
- [27] 吉本靖俊, 吉田秀樹, 玉井昭治, など. 新若戸沈埋トンネルにおける充てんコンクリートの開発と施工[C]//土木建設技術シンポジウム論文集, 2006
- [28] 土木学会: 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)[M]. 東京: コンクリートライブラリー73, 土木学会, 1992 (JSCE Research Subcommittee on Steel-Concrete Sandwich Structures. Design code for steel-concrete sandwich structures [M]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1992 (in Japanese))
- [29] Montague P. A simple composite construction for cylindrical shells subjected to external pressure [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1975, 17(2): 105-113
- [30] Smith D W, Solomon S K, Cusens A R. Flexural tests of steel-concrete-steel sandwiches [J]. Magazine of Concrete Research, 1976, 28(94): 13-20
- [31] Xie M, Foundoukos N, Chapman J C. Static tests on steel-concrete-steel sandwich beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(6): 735-750
- [32] Yan J B, Liew J Y R, Zhang M H. Experimental and analytical study on ultimate strength behavior of steel-concrete-steel sandwich composite beam structures [J]. Materials and Structures, 2015, 48(5): 1523-1544
- [33] Leng Y B, Song X B. Experimental study on shear performance of steel-concrete-steel sandwich beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 52-61
- [34] Leng Y B, Song X B, Chu M, et al. Experimental study and theoretical analysis of resistance of steel-concrete-steel sandwich beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(2): 04014113
- [35] Leng Y B, Song X B, Wang H L. Failure mechanism and shear strength of steel-concrete-steel sandwich deep beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 106: 89-98
- [36] Yan J B, Liew J Y R, Qian X, et al. Ultimate strength behavior of curved steel-concrete-steel sandwich composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 115: 316-328
- [37] Yan J B, Liew J Y R. Design and behavior of steel-concrete-steel sandwich plates subject to concentrated loads [J]. Composite Structures, 2016, 150: 139-152
- [38] Liew J Y R, Wang T Y. Novel Steel-concrete-steel sandwich composite plates subject to impact and blast load [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(4): 673-687
- [39] Dai X X, Liew J Y R. Fatigue performance of lightweight steel-concrete-steel sandwich systems [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(2): 256-276
- [40] 卢显滨. 双钢板-混凝土组合梁拟静力试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015 (Lu Xianbin. Experiment study on the steel-concrete-steel composite beam subjected to cyclic lateral loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese))
- [41] 刘进. 核电工程钢板混凝土组合剪力墙面外弯剪性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016 (Liu Jin. Study on the bending shear performance of steel plate reinforced concrete structure for nuclear power plants under out-plane load [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016 (in Chinese))
- [42] Standard Specifications for Concrete Structures—2007 “Design” [S]. Tokyo: Japanese Society of Civil Engineering, 2010
- [43] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011 (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese))
- [44] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015 (JTG D64—2015 Specifications for design of highway steel bridge [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015 (in Chinese))
- [45] Eurocode 2 Design of concrete structures—Part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels, Belgium, 2004
- [46] JGJ 138—2016 组合结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016 (JGJ 138—2016 Code for design of composite structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese))
- [47] Nie J G, Hu H S, Fan J S, et al. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete filled double-steel-plate composite walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88(9): 206-219

宋神友 (1974—), 男, 学士, 教授级高级工程师。主要从事工程建设与工程管理研究。

聂建国 (1958—), 男, 博士, 教授。主要从事组合结构研究。

徐国平 (1965—), 男, 硕士, 教授级高级工程师。主要从事桥梁与隧道工程设计及研究。

樊健生 (1975—), 男, 博士, 教授。主要从事组合结构研究。

唐亮 (1981—), 男, 博士, 教授级高级工程师。主要从事组合结构研究。

郭宇韬 (1992—), 男, 博士研究生。主要从事组合结构研究。