

文章编号: 0451-0712(2006)07-0053-04

中图分类号: U445.73

文献标识码: B

# 跨海湾桥梁裂缝的修补技术研究

张运波<sup>1,2</sup>, 李永强<sup>1</sup>, 潘家英<sup>1</sup>

(1. 中国铁道科学研究院铁建所 北京市 100081; 2. 石家庄铁道学院土木分院 石家庄 050043)

**摘 要:** 分析了跨海湾桥梁容易出现裂缝的原因以及危害, 并针对海湾桥梁出现裂缝的特点, 对裂缝进行了分类, 根据不同类型裂缝, 提出了不同处理裂缝的工艺措施和修补方法, 可为处理海湾桥梁的裂缝问题提供有益的借鉴。

**关键词:** 海湾桥; 耐久性; 裂缝; 修补; 加固

随着我国跨海湾桥梁的开始修建, 对桥梁结构的耐久性也提出了更高的要求, 许多重大工程都将设计使用寿命提高到 100 年以上。为了提高跨海湾桥梁结构的耐久性, 人们采用了高强、高性能海工混凝土(HPC)材料来进行施工, 并通过采取加厚保护层, 掺加外加剂等辅助措施, 来提高跨海湾桥梁混凝土的耐久性, 但这些措施也随之带来了容易导致预应力混凝土结构产生早期裂缝的问题。早期的微裂往往是后期宏观开裂的开始, 裂缝在使用荷载或外

界物理及化学因素作用下, 不断产生和发展, 会引起混凝土碳化、保护层剥落及钢筋锈蚀, 使钢筋混凝土强度和刚度受到削弱, 耐久性降低。特别是一些跨海湾桥梁, 因为所处外界环境的特殊性, 其裂缝的存在, 即使微小裂缝, 也会影响桥梁结构的耐久性, 严重时甚至发生垮塌事故, 危害结构的正常使用, 这与高性能混凝土以耐久性为宗旨的设计指标是相矛盾的。所以对高性能混凝土的早期开裂问题以及桥梁运营时期的裂缝修补技术进行研究, 具有一定的实

收稿日期: 2005-12-20

截面变得薄弱。

(2) 由于套箱体下沉不可能完全同步, 可能会造成套箱与系梁相接处的扭动, 容易进水, 有时堵水较困难。

## 5 改进措施

对于改变了系梁本是一次浇注成型变成两次浇注才能成型的问题, 可采用适当增加接头处的构造钢筋来处理, 如果是对防腐要求较高的桥梁解决就较困难些。对于上述两个问题可采用改进套箱的结构来综合解决: 即用两个套箱和中间一个钢圆筒或矩形空心钢梁组成如图 8 所示的套箱体, 这样就解决了存在的问题。因钢套箱内抽掉水后, 受钢横筒上浮的影响, 宜在套箱顶设一道对拉缆绳以平衡。

## 6 结语

采用套箱施工水中系梁工艺简单成熟, 投入较少, 施工速度较快, 能保证工程质量, 对外界环境要求不高, 是一个不错的水中系梁施工方法。在水流流

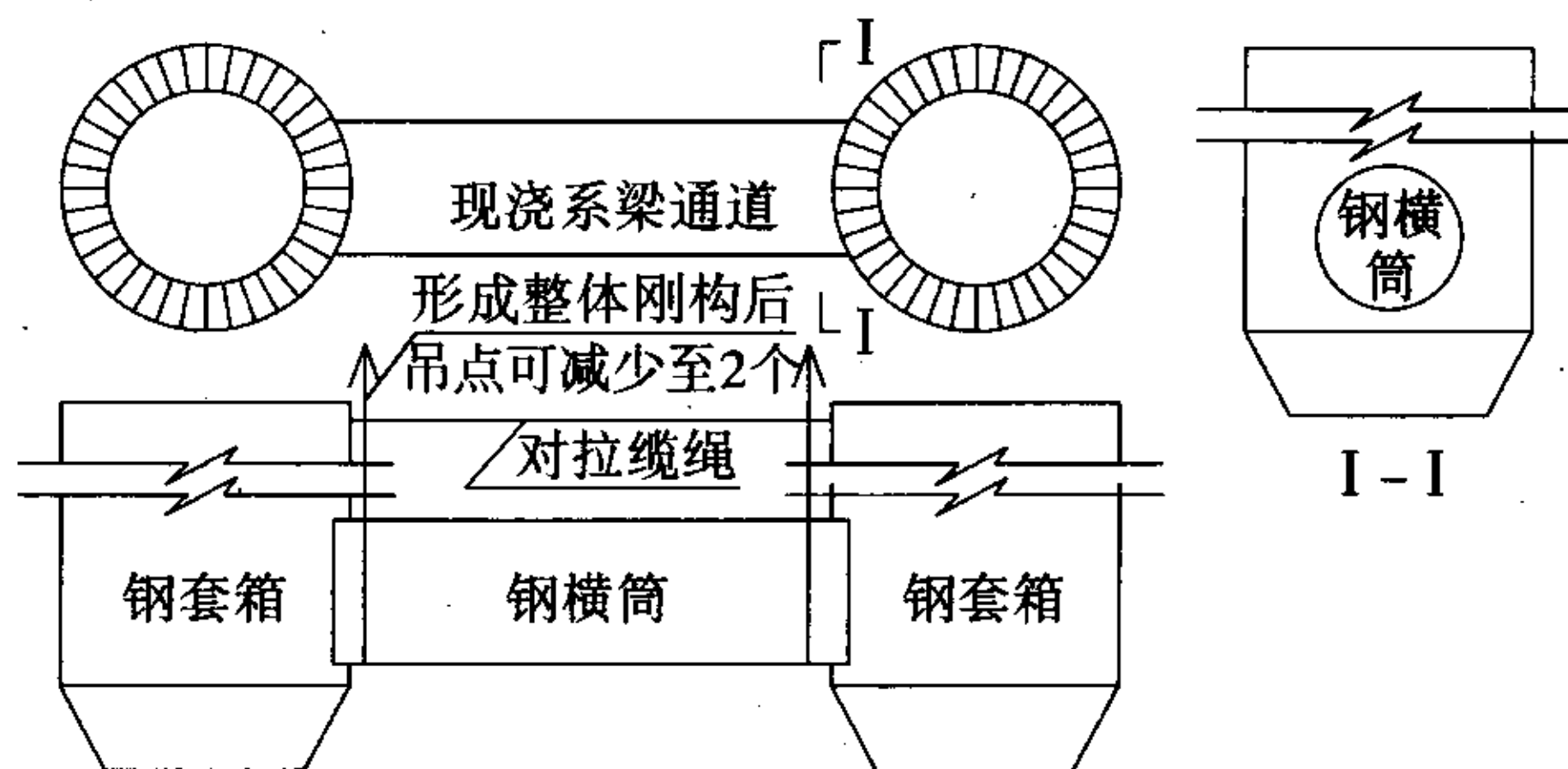


图 8 改进后的套箱结构示意图

速较大的河中施工时, 要注意套箱失稳, 计算时要考虑水流冲击的影响, 或在构造上考虑加强。

## 参考文献:

- [1] 钢结构学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 简明施工计算手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 地下工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.



用价值和科研价值。

### 1 裂缝产生原因以及危害

从裂缝起因来看,裂缝主要分为因外荷载应力引起的裂缝和变形变化引起的裂缝两大类。根据国内外有关的调查资料,前者约占 20%,后者约占 80%。这里主要讨论混凝土早期变形裂缝的产生原因以及针对早期裂缝的预防措施。早期变形裂缝主要是指 45 d 以内并主要是由于混凝土变形引起的裂缝,如温度裂缝、收缩裂缝、沉缩裂缝等。

现浇混凝土结构早期开裂是工程中存在的普遍现象,多年来一直未得到较好地控制和解决。特别是 20 世纪 90 年代以来,随着高强、高性能混凝土在世界范围内的广泛应用,早期开裂和早期性能劣化问题比以往更为严峻。一般认为,混凝土早期开裂不是由荷载的作用引起的,而是由变形的作用如温度变形、收缩变形等体积改变因素而引起的。单纯的变形并不会产生应力和裂缝,只有变形得不到满足而受到约束限制时,才会产生应力并导致开裂。大体积混凝土结构特别是超静定结构中,构件变形的彼此约束是普遍存在的,模板、钢筋、基底也会对混凝土产生约束,甚至同一构件内部由于温度梯度和湿度梯度的差异引起应变梯度,也会产生约束机制。约束应力的的大小除了和绝对变形量直接相关外,还与材料弹性模量、结构刚度、约束刚度、约束方式等因素有关。当约束应力超过材料的即时抗拉强度时,或者约束拉应变达到了材料允许的极限变形时,就产生了裂缝。混凝土早期变形裂缝影响因素众多,是复杂的综合性问题,文献[2]从结构、施工环境、材料及配比三方面进行了综述,并从变形以及约束角度,详细介绍了引起裂缝的原因,这里不再过多介绍。

混凝土裂缝对桥梁结构耐久性之所以会产生影响,主要是因为裂缝增大了混凝土的渗透性,使空气中的有害气体或物质容易渗入混凝土内,致使钢筋钝化膜较早破坏,钢筋产生锈蚀。对于一般钢筋混凝土构件,在一般环境条件下,钢筋产生一定的锈蚀是允许的,但对跨海湾桥梁结构来说,由于所处外界环境中含有大量的盐分(主要是  $\text{Cl}^-$  离子的存在),其水上部位尤其是经常受浪花溅湿的地方,由于盐分的不断积累,提高了混凝土的导电性质和钢筋周围氯离子的浓度,即使微小裂缝,也会加快钢筋钝化膜的破坏,加快钢筋的锈蚀。钢筋的锈蚀会因锈蚀孔的形成产生应力集中,使钢筋容易发生应力腐蚀开裂。

另一方面,钢筋的锈蚀因生成锈蚀产物而具有体积膨胀的效应,使混凝土产生裂缝,而混凝土中形成裂缝后,海水中促进锈蚀物质更容易到达钢筋表面,从而形成一种恶性循环,加速钢筋混凝土结构的破坏。这种破坏是悄悄进行的,锈蚀的速度是比较漫长的,常不为人们所发觉,但破坏的后果是严重的,所以对跨海湾桥梁的裂缝预防以及以后的裂缝修补问题必须引起足够的重视。

### 2 预防裂缝的措施

针对高强度、高性能混凝土早期开裂的原因,国内外有大量文献研究预防早期裂缝产生的措施,现简单综述如下。

从材料方面入手,可以在混凝土中通过掺加聚丙烯纤维、钢纤维、粉煤灰或矿粉等材料来提高高性能混凝土的抗裂性。这一点在一些工程实例中已经得到了应用和验证,具有一定的抗裂效果。为了预防塑性沉降裂缝,可以采取基础处理、科学设计支架搭设、对支架进行全面预压以消除非弹性变形等措施,以及在混凝土中加减水剂减少混凝土泌水、确保混凝土保护层厚度、混凝土施工时进行二次抹面等措施。为预防塑性收缩裂缝,应加强早期混凝土养护以降低混凝土中水分蒸发速率,方法是在结构外露面覆盖麻袋、海绵,然后进行浇水养护。防治干缩裂缝的措施有布设足够的控制裂缝的分布筋、减小水灰比、增加骨料用量、增大骨料粒径、加强混凝土的养护等。为预防混凝土温差裂缝,应合理安排混凝土浇注顺序及浇注速度,在混凝土浇注的过程中降低部分温差。夏季施工时骨料要洒水降温,冬季施工时混凝土表面应覆盖保温。为预防龟裂,水泥用量不宜过多,振捣要密实但不能过振,混凝土表面泌水及浮浆要及时清除并注意及时养护等。这些有力措施都在实际工程实践中得到了应用和验证,具有一定的减少裂缝和防止裂缝出现的良好效果。但许多工程实例都说明,尽管在对桥梁施工过程中采取了多种预防裂缝产生的措施,但仍避免不了裂缝的出现。所以对混凝土结构物来说,出现裂缝是绝对的,没有裂缝是相对的。为了使跨海湾桥梁达到设计的使用寿命值,提高其耐久性,仅仅采取采用高性能混凝土以及一定的预防裂缝产生措施是不够的,还要对海湾桥梁运营过程中的裂缝修补技术进行研究。

### 3 修补裂缝的技术研究

随着我国一部分桥梁到了修补加固期,桥梁裂



缝的修补技术,从材料研制到施工工艺的研究,以及对应修补加固规范等,已基本上走向成熟阶段。国内多家桥梁加固工程公司的存在以及多家科研院所(比如中国铁道科学研究院、中国建筑科学研究院以及中国冶金建筑研究院等)在修补加固方面科研成果的出现,就充分说明了这一点。但由于我国跨海湾桥梁刚刚开始进入修建期,针对海湾桥梁的后期养护、修补工作和相应的技术研究工作在国内还是一比较新的课题。跨海湾桥梁由于所处环境的特殊性,其后期桥梁的维修养护都比内陆桥梁的要求要高很多,但内陆桥梁的修补工艺和技术以及相应规范可以借鉴到海湾桥梁的修补工作中来,为海湾桥梁的修补工作提供参考。由于国外尤其是日本出现混凝土耐久性问题较早,在高强、高性能混凝土裂缝的预防与修补两方面都取得不少成果,具有很丰富的经验,所以日本的一些修补材料和工艺可以借鉴。再一点就是我国有许多港口结构物如海港码头等,大都已到了维修加固期,其积累的相应经验和修补工艺也可以借鉴到海湾桥梁的裂缝修补工作中来,但由于海湾桥梁结构的结构形式(跨径大)和所受荷载情况(移动荷载)与港口结构物不同,所以对其修补工艺和经验,只能作为参考,而不能照搬。

要对一个结构物进行修补或加固,首先要对它进行鉴定和评估。对于我国来说,对跨海湾桥梁的鉴定和评估还没有成熟的规范和要求,所以在这里借鉴海港码头结构物的鉴定评估标准,结合桥梁裂缝的分类来对海湾桥梁的裂缝情况做一分析。

目前,对于港口码头结构物进行鉴定和评估主要分两个阶段。

(1)一般调查:主要以外观检查为主,调查结构有无表面损伤,以论证是否有必要进行详细调查。针对海湾桥梁来说,就是通过一定的仪器(超声波检测仪和高倍数放大镜等)和手段,检查裂缝的情况和损伤程度。

(2)详细调查:通过外观检查,详细调查和记录结构开裂或混凝土剥落产生的原因、数量及分布情况;同时,结合使用其他技术手段,以达到对结构健康状况的量化认识。

对于港口码头结构物来说,一般分为四级健康标准:如果没有表面顺筋锈胀裂缝,属于Ⅰ级或Ⅱ级;若有锈胀裂缝现象,则属于Ⅲ级健康水平;有锈胀引起的混凝土剥落现象,则属于Ⅳ级健康水平。

而针对跨海湾桥梁结构来说,以上调查阶段以

及分级情况可以作为参考,也可以作为修补工作前期准备工作的一部分。对桥梁结构的检测和诊断以及鉴定和评估,本身就是一门很重要的研究课题,在国内同行中,又以中国铁道科学研究院实践经验丰富,科研成果多,而在桥梁检测和诊断研究工作中处于国内领先地位。这里由于篇幅所限,对桥梁检测和诊断工作不做过多介绍。

随着跨海湾桥梁的开始修建,桥梁工程界人士已充分认识到了日后修补工作的重要性。结合已有研究成果和实验,杭州湾大桥工程指挥部和上海港湾工程设计研究院初步制定了《杭州湾跨海大桥混凝土裂缝及缺陷修补技术规程》(以下简称《规程》),把裂缝情况分为几个级别,不同级别采取不同的修补处理方式,但没有提及具体的施工工艺问题。本文就根据本技术规程对相应不同裂缝的修补材料以及施工工艺做一研究和分析。《规程》内裂缝划分情况如下。

(1)预计今后在使用荷载作用下不会进一步发展的裂缝,当裂缝宽度 $d \geq 0.15 \text{ mm}$ ,应采用化学灌浆修补;裂缝宽度 $d < 0.15 \text{ mm}$ ,应采用表面封闭修补。

(2)预计今后在使用荷载作用下会进一步开展的裂缝,当 $0.1 \text{ mm} \leq d < 5 \text{ mm}$ ,宜采用弹性模量较小、粘结强度较高,且收缩小的树脂类材料进行化学灌浆修补;当裂缝宽度 $d < 0.1 \text{ mm}$ ,宜采用弹性模量较小的树脂类胶泥封闭修补。

(3)宽度 $d \geq 5 \text{ mm}$ 的裂缝及结构的受力裂缝修补或加固,应根据裂缝调查情况和分析结论,确定修补和加固方案。

以上裂缝问题的划分不是绝对的,在进行裂缝修补工作时,应根据裂缝所处位置、走向以及受力情况,再具体确定修补方案。

相对于跨海湾桥梁裂缝的修补问题来说,首先对修补材料应该有特殊的要求。修补材料重点应该着眼于其耐久性和适用性,因此要求修补材料必须具有粘结牢固、密实抗裂、耐冲刷等性能。此外,修补材料还应具有很高的流动性而不离析、不泌水、抗渗性强,能不经振捣而自动流平并充满模型和包裹钢筋,且流动性随时间变化小。日本的SHO-BOND系列、新日铁系列修补材料以及国内科研院所各自研制开发的一系列修补裂缝的材料,其性能基本都能满足相关海湾桥梁修补材料特性条件要求,见表1。



表1 跨海湾桥梁化学灌浆修补材料性能指标

项目	抗拉强度	抗压强度	与干燥混凝土粘结强度	与潮湿混凝土粘结强度	弹性模量
指标/MPa	$\geq 20$	$\geq 60$	$\geq 2.0$	$\geq 1.5$	$\leq 2.8 \times 10^4$

对于跨海湾桥梁的裂缝修补问题,除了修补材料有特殊要求外,第二点就是对修补工艺的特殊要求。相对海湾桥梁来说,修补工艺一是要考虑修补后的耐久性问题,二是要考虑施工工艺要简单可行。针对《规程》提到的裂缝分类情况以及施工工艺的要求,现根据现有的各种处理裂缝的施工工艺进行比较选择。

对于封闭裂缝施工工艺来说,铁道科学研究院研制的TK型封缝粉,以及相关施工工艺是个不错的选择,其施工方法简单,封闭效果良好(在珠江三角洲地带多座桥梁修补工程上已得到实际应用和验证),具有长期防水、防渗等特点,可调外观颜色与其他部位一致,是很好的封闭海湾桥梁裂缝的方法和工艺。

对于化学灌浆施工工艺,在行业内要属日本SHO-BOND公司系列“壁可”施工方法最有特点,并且修补材料性能以出众的耐久性,材料固化后不会受雨水、海水、酸、碱、二氧化碳等的破坏而在裂缝修补中得到广泛应用。所以针对跨海湾桥梁的需要灌浆施工修补的裂缝,可以选择“壁可”注入法进行施工,其施工工序为:检查裂缝→清理裂缝→封闭裂缝→安装注入器→通风检查→安装过滤器、阀门、手压注浆枪→注浆→补压→清理完成。该施工工艺和相应的配套灌浆材料已得到广大工程界人士的普遍认可,并且在日本海湾桥梁修补工作中得到过应用,效果良好,可以借鉴到我国海湾桥灌浆类裂缝( $d \geq 0.15 \text{ mm}$ )的日后修补工作中来。

对于因为外荷载作用形成的受力裂缝( $d \geq 5 \text{ mm}$ ),特别是在汽车荷载作用下会发生变化,继续开裂的裂缝,可根据具体情况,经过详细和科学的计算,先对裂缝灌浆封闭处理后,再采取一定的加固方案,并且要充分考虑加固修补材料的耐腐蚀性和可操作性。粘贴钢板施工法虽然有时可以提高对活载的抵抗力,但不适用于跨海湾桥梁加固,因为防锈蚀是个难于解决的问题。用碳纤维布材料(CFRP)修复补强混凝土结构是近几年新发展起来的一种混凝土修补技术,其机理是利用环氧树脂将碳纤维布材料粘贴在混凝土结构的表面,与混凝土

结构形成一体共同工作,利用碳纤维布材料卓越的抗拉强度达到增强构件承载能力的目的。碳纤维布材料具有轻质高强、抗腐蚀、耐老化、耐久性好、物理性能稳定等诸多优点,其抗拉强度约为同等截面钢材的7~10倍。其修补混凝土结构除了材料性能优异以外,主要是施工工艺方便,相对其他修补方法来说,它不需要支模、浇混凝土、植筋、装拆支架等繁杂工序,并且该材料质量轻,可操作性强。所以针对跨海湾桥梁结构修补加固工程来说,用碳纤维布材料对结构物进行加固补强,是个不错的选择。

裂缝修补过后,效果究竟如何,进行后期跟踪监测,也是保证其耐久性的一项有力措施。中国铁道科学研究院曾经给国内很多座著名大桥工程做过长期监测工作,并取得一定的研究成果。特别针对海湾桥梁来说,后期运营过程中的长期监测和养护工作,是后期工作中保证桥梁耐久性的重点研究工作。

#### 4 结语

本文论述分析了跨海湾桥梁高性能混凝土的裂缝产生机理及危害,从“防”和“治”两个方面提出了对策和措施,可得出如下结论。

(1)对于跨海湾桥梁结构的高性能混凝土来说,由于结构设计、施工方法、环境条件、原材料选择及配合比设计、外加剂和掺合料的使用等各方面的原因,一般都会存在裂缝病害的问题。

(2)由于海湾桥梁所处环境的特殊性,必须对出现的裂缝采用合适的修补材料以及相应的施工工艺尽早进行处理。修补材料的选用以及施工工艺的选择,要根据海湾桥梁的特点和要求进行。本文提出的裂缝修补工艺可为海湾桥梁以后的裂缝修补工作提供参考。

(3)海湾桥梁结构修补后效果如何,以及运营过程的长期监测问题,还有待于在今后的工程实践以及研究工作中进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 陈锡民. 混凝土桥梁早期裂缝的成因与防治[J]. 桥梁建设, 2000, (4).
- [2] 邢锋, 明海燕. 沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 赵鑫. 海水浸蚀桥梁病害的分析和整治[J]. 山西建筑, 2003, (7).
- [4] 虞雅梅. 桥梁工程混凝土施工裂缝产生原因及改善措施[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2002, (2).