

混凝土肋式转向装置力学性能

杨明^{1,2}, 黄侨^{1,2}, 荣学亮²

(1. 东南大学 交通学院, 210096 南京, bartty_ym@sina.com; 2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 针对波纹钢腹板体外预应力箱梁结构的力学和构造特点, 采用有限元分析与实验研究相结合的方法, 研究用于波纹钢腹板体外预应力箱梁的混凝土肋式转向装置的承载机理、受力特点、破坏形态、极限承载力等力学特性. 采用非线性有限元方法对结构从加载开始直至破坏的受力全过程进行了模拟分析, 并用实验对有限元分析的结果进行验证, 二者吻合良好. 结果表明: 转向装置对混凝土翼缘板的局部影响集中在转向装置与混凝土翼板连接部分及附近区域内; 转向装置破坏时, 受拉区混凝土受拉开裂、环向钢筋受拉屈服, 而受压区混凝土受压劈裂破坏; 转向装置受压区混凝土的受力表现出明显的偏心受压构件的受力特点. 研究结果可供工程设计人员在设计波纹钢腹板体外预应力箱梁转向装置时参考.

关键词: 波纹钢腹板; 体外预应力箱梁; 混凝土肋式转向装置; 力学性能

中图分类号: U441 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)10-0119-05

Mechanical characters of concrete rib deviator

YANG Ming^{1,2}, HUANG Qiao^{1,2}, RONG Xue-liang²

(1. School of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China, bartty_ym@sina.com;

2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: According to the mechanical and structural characters of externally prestressed box girder with corrugated webs, the mechanical performance, such as load bearing mechanism, mechanical characters, damage form and ultimate load capacity of concrete rib deviator used in externally prestressed box girder with corrugated webs is studied using FEA (Finite Element Analysis) and experimental methods. The experimental and FEA results fit each other well. The research indicates that the local influence in concrete flange caused by deviator concentrates in the joints of deviator and concrete flange and the nearby location. When the deviator damages, the tensional concrete cracks and the round reinforcements yield and compressional concrete splits. The compressional concrete shows obvious characteristics of eccentric compression member. The conclusion of this paper may be helpful for designers in designing deviators of externally prestressed box girder with corrugated webs.

Key words: corrugated webs; externally prestressed box girder; concrete rib deviator; mechanical characters

作为预应力混凝土箱梁的一种改进形式, 波纹钢腹板体外预应力箱梁采用了具有良好力学性能的波纹钢板作为结构的腹板, 解决了传统预应力混凝土箱梁结构预应力管道布置繁琐、施工复杂、管道灌浆质量不易保证、腹板裂缝难于控制、

腹板开裂后预应力筋锈蚀严重影响桥梁结构的耐久性、混凝土腹板对结构收缩徐变的约束降低了预应力的效率等一系列难以解决的问题^[1-2]. 与传统预应力混凝土箱梁相比, 这种结构具有重量轻、预应力效率高、施工简便、耐久性好、造型美观等优点^[3-4].

在体外预应力结构中, 体外预应力筋通过转向装置改变方向从而形成预应力折线配筋, 体外预应力筋对梁体的作用也通过转向装置传递. 可见, 转向装置是体外预应力混凝土结构中最关键

收稿日期: 2010-05-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078078);

交通部西部科技项目(200538181215).

作者简介: 杨明(1980—), 男, 博士, 讲师;

黄侨(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

的构造之一. 体外预应力的转向装置通常有横隔板式、肋式和块式 3 种, 见图 1. 在 3 种转向装置中, 肋式转向装置的体积和重量介于横隔板式和块式之间, 同时承载能力也介于二者之间. 肋式转向装置通常由钢管转向器、环向钢筋、周边箍筋以及周围混凝土构成. 承载力主要通过转向肋柱体受压承担, 环向钢筋和受拉区混凝土也可提供一部分的承载力.

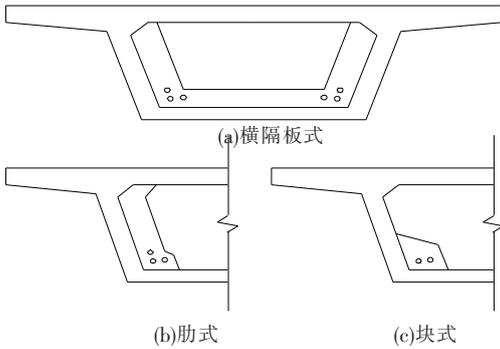


图 1 体外预应力混凝土箱梁的转向装置形式

本文采用有限元模拟分析与实验相结合的方法, 研究了波纹钢腹板体外预应力箱梁混凝土肋式转向装置的力学性能^[2], 旨在为该类桥梁结构设计提供理论依据.

1 混凝土肋式转向装置有限元分析

1.1 有限元模型的建立

1.1.1 模型建立的原则和非线性问题的简化

采用通用有限元软件 ABAQUS 对混凝土肋式转向装置进行非线性有限元分析, 研究内容主要为转向装置的力学性能和转向装置对箱梁翼缘板的局部影响. 转向装置从承受转向力开始直至破坏的过程是一个复杂的力学过程, 包含了多种非线性力学模式. 为减少计算成本, 使模型计算更易于收敛, 建模时根据研究的目的对模型进行了适当的简化, 忽略了对结构影响较小的部分非线性问题(如梁段模型中的混凝土材料非线性和波纹钢板与混凝土翼缘板间的接触非线性等). 有限元分析过程中, 分别建立了梁段模型和肋式转向装置局部模型. 其中梁段模型主要研究转向装置对混凝土翼缘板的局部影响, 而转向装置局部模型则主要研究转向装置从开始受力到破坏的全过程力学行为.

1.1.2 梁段模型

梁段模型主要用以研究转向装置对梁段的局部影响. 由于在体外预应力筋加载过程中上下钢筋混凝土翼板基本处于弹性受力阶段, 因此在模型分析中忽略了混凝土材料的非线性影响. 梁段

模型中, 最主要的组件是带肋式转向装置的梁段, 除此之外梁段模型中还包括了提供转向力的体外预应力筋、转向装置中的转向器、普通钢筋、环向钢筋、波纹钢腹板以及模拟支座的支撑等组件. 全部组件采用国际单位制(m、Pa、N)按照实验中的真实尺寸建模, 主要组件和装配后模型见图 2.

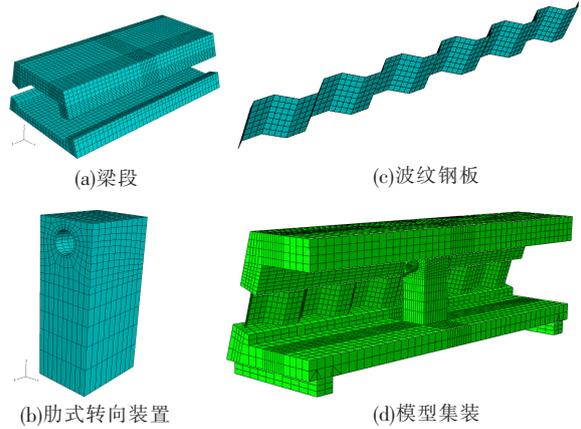


图 2 梁段模型

由于二阶单元不适于带有接触非线性和材料非线性问题的模拟^[5], 梁段模型中实体组件(混凝土梁段、转向装置、转向器和体外预应力筋)选择了 C3D8R 这种减缩积分的一阶六面体单元. C3D8R 单元在弯曲荷载作用时不会发生剪切自锁, 对于弹塑性问题又不会产生体积自锁, 适合于本模型^[6-7]. 为壳组件(波纹钢腹板)选择了减缩积分的 4 节点壳单元 S4R、为线组件(普通钢筋和环向连接钢筋)选择了 2 节点三维桁架单元 T3D2. 对于采用 C3D8R 单元的三维实体组件, 通过合理规划模型, 在网格划分时使用结构化网格划分技术, 划分出的网格质量良好. 在转向装置附近的区域将网格适当加密.

1.1.3 转向装置局部模型

转向装置局部模型中仅包含: 与转向装置直接相连的小段梁体、转向装置和转向器, 见图 3. 转向装置局部模型中主要考虑的非线性问题是混凝土与钢筋的材料非线性, 单元和材料本构选择应满足弹塑性分析要求. 根据这一原则, 为混凝土与钢管的三维实体组件选择了 C3D8R 单元, 为钢筋选择了理想弹塑性本构, 为混凝土材料选择了塑性损伤模型的混凝土本构. 需要说明的是, 塑性损伤模型通过定义反映混凝土受拉开裂及受压破碎的损伤因子, 改变损伤后混凝土的弹性模量, 并以此模拟混凝土受力破坏过程中逐渐失去承载力的力学行为. 采用塑性损伤模型的构件, 通过拉伸塑性应变模拟裂缝的产生和程度. 由于在进行弹塑性分析时, 较密的网格有利于计算的收敛. 因

此,在转向装置局部模型中,加大了网格密度,使得划分出的单元尺寸接近混凝土骨料粒径。

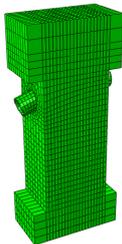


图 3 转向装置局部模型

1.2 梁段模型的计算结果和分析

1.2.1 梁段模型的计算结果

图 4 为梁段模型计算得到的实验梁在实验荷载作用下的等效应力 (Mises 应力) 云图。在图中可以看出转向装置对结构的局部影响主要集中在梁体与转向块连接的部分及附近的一小块区域。该区域在纵向和横向的大小约为转向装置自身尺寸的 2 倍。钢筋混凝土翼板受到转向装置局部影响区域的等效应力值在 1 ~ 5 MPa 之间,离开这一范围应力迅速减小。受环向钢筋粘结力作用影响,最大应力位于上翼板下缘环向钢筋与翼板相连处,最大值为 5.98 MPa。

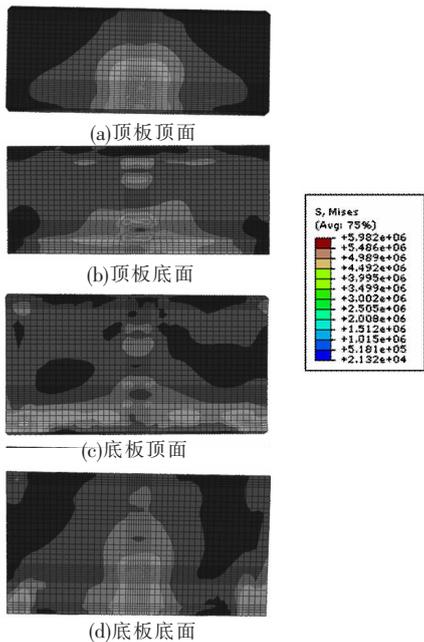


图 4 梁段模型 Mises 应力云图

1.2.2 接触非线性对结构的影响

梁段模型模拟了体外预应力筋与转向器的接触作用,根据计算结果拟合得到了体外预应力钢筋与转向器接触面间的接触压应力分布曲线 (式 (1)),见图 5。在转向装置局部模型中采用该曲线定义体外预应力筋的接触压应力荷载分布曲线。分析表明,接触压应力是不均匀的。通过计算发

现,在梁段模型中是否考虑接触非线性的影响对翼缘板应力的计算结果影响很小 (差别不到 1%)。但在转向装置局部计算时如果忽略了接触非线性 (将体外预应力筋与转向器间接触压力按均匀压力处理),对转向装置的应力分布以及环向钢筋应力都会有较大影响。如图 5 所示,除转向器两端出口处较小以外,接触压应力的变化基本呈现随转向器偏转角度的增加而增加的趋势。

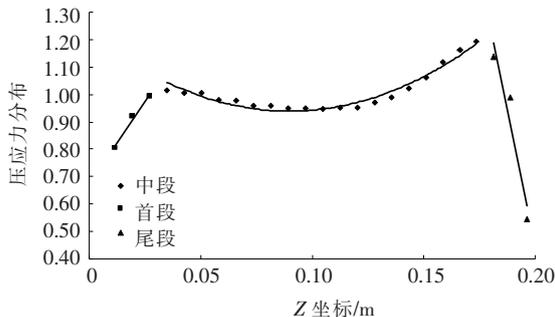


图 5 转向装置局部模型的压应力分布曲线

$$q(z) = 12.101z + 0.6689, 0 \leq z < 0.0234;$$

$$q(z) = 34.979z^2 - 6.287z + 1.2208, 0.0234 \leq z \leq 0.17747,$$

$$q(z) = -39.46z + 8.3393, 0.17747 < z \leq 0.2.$$

(1)

式中: $q(z)$ 为接触压应力沿梁长方向的不均匀系数; z 为以转向器与转向块一端连接处为零点,沿梁长方向的坐标。

1.3 转向装置局部模型的计算结果和分析

转向装置局部模型模拟了转向装置从加载开始到破坏 (540 kN) 的全过程。从竖直方向应力云图 (图 6) 上可以明显发现,肋式转向装置分为受拉 (转向器以上区域) 和受压 (转向器以下区域) 2 种受力区域。在张拉力达到极限荷载时的转向装置塑性应变云图上可以发现,转向器以下的受压混凝土已经产生了明显的塑性变形,而受拉区混凝土则全截面形成明显的受拉区域,裂缝明显开展并贯通整个转向装置,见图 7。

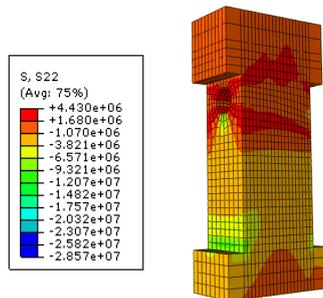


图 6 转向装置竖向应力云图

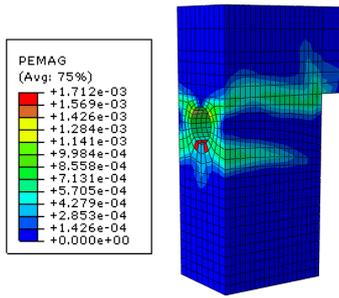


图 7 转向装置塑性应变云图

2 混凝土肋式转向装置的实验研究

2.1 实验设计和加载方案

2.1.1 实验梁段设计

实验梁段计算长度 $L = 2\text{ m}$, 实验梁段尺寸及配筋见图 8. 顶底板纵向钢筋采用直径为 $\phi 12$ 的 HRB335 钢筋. 箍筋及环向钢筋采用直径为 $\phi 8$ 的 R235 钢筋. 标准件实验测定实验梁段的混凝土强度为 35.1 MPa. 波纹钢板采用厚度为 6 mm 的 A3 钢板压制而成. 波纹钢板通过带圆孔钢板与混凝土顶、底板连接, 圆孔直径为 3 cm. 为方便平衡转向力的竖向分力, 实验中将实验梁段倒置并在两端简支, 见图 9. 为方便描述, 将朝上的钢筋混凝土翼缘板称为顶板(上翼板).

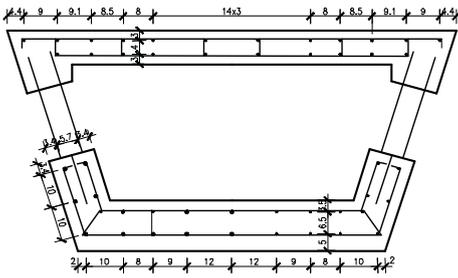


图 8 主梁配筋图 (cm)



图 9 就位后的实验梁段

2.1.2 转向装置构造和应变传感器布置

实验梁 CEC-3 采用混凝土肋式转向装置, 其构造见图 10. 转向器(圆钢管)通过 2 排环向钢筋与翼板纵向钢筋相连. 在环向钢筋表面设置了钢筋应变片, 在顶板上表面设置了混凝土应变片.

应变片布置和编号见图 11.

2.1.3 加载方案

实验采用 4 根 $\phi 15.2$ 钢绞线为实验梁段提供预应力. 钢绞线的张拉角度为 14° . 钢绞线一端用地锚锚固, 另一端穿过反力墙, 用千斤顶张拉(如图 12). 实验采用分级加载, 在反力墙与张拉千斤顶之间设置压力传感器控制张拉力, 张拉加载时每 50 kN 为一级. 在每级加载到指定张拉力后维持荷载 5 min, 以保证试件各部分均匀受力, 尽量消除突加荷载对实验的影响. 持续加载直至转向装置破坏结束.

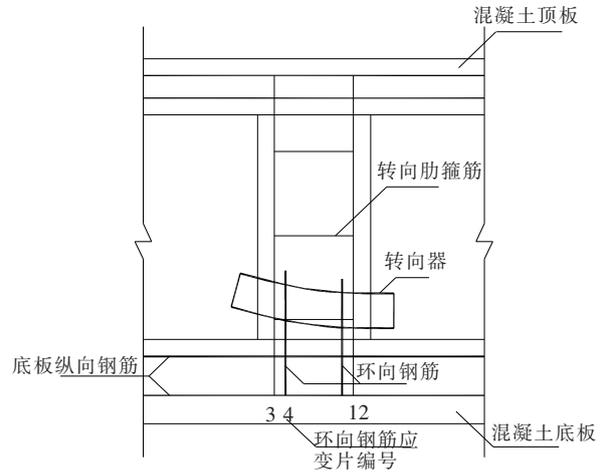


图 10 混凝土肋式转向装置构造

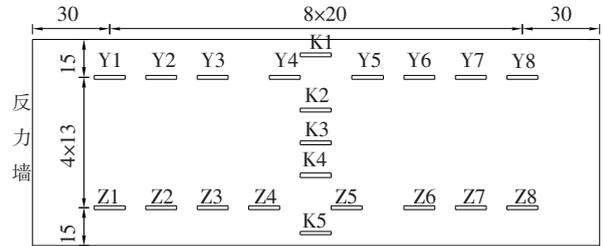


图 11 实验梁 CEC-3 顶板表面应变片布置 (cm)

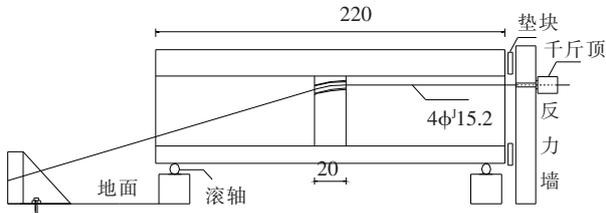


图 12 实验加载示意 (cm)

2.2 实验结果及分析

肋式转向装置在张拉力作用下, 环向钢筋及周围混凝土受拉, 转向器下侧混凝土区域受压, 两部分共同协作. 在环向钢筋荷载应变关系图中可以看到(图 13), 环向钢筋应变在 400 kN 之前基本呈线性规律增长; 实验荷载达到 400 kN 后逐渐呈现非线性受力特点, 由于下部的混凝土部分发

生开裂,对于转向器的约束降低,环向钢筋承受荷载增加,较大的拉拔力使得环向钢筋应变迅速增加;达到 540 kN 左右时,转向器下混凝土劈裂,环向钢筋屈服,转向装置破坏.肋式转向装置破坏后,转向装置表面可见明显的劈裂缝,部分混凝土也已脱落(图 14).在整个实验过程中,混凝土翼板的应变较小,保持在弹性受力状态(图 15).

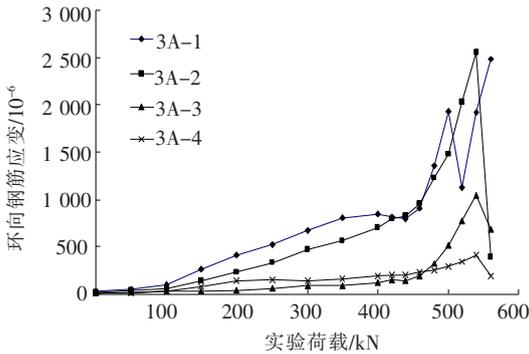


图 13 混凝土肋式转向装置环向钢筋应变



图 14 转向装置破坏后照片

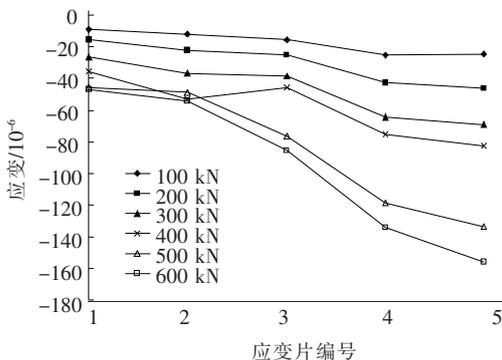


图 15 跨中混凝土顶板上缘应变

3 有限元分析与实验研究的对比

将实验中采集到的环向钢筋应变记录转化为应力与对应的转向装置局部模型分析结果进行对比(图 16).有限元分析与实验结果都显示,在实验荷载小于 400 kN 时,转向力主要由转向肋承受,环向钢筋应力相对较小.而当实验荷载超过 400 kN 后,受压混凝土的应力达到其抗压强度极限值.受压较大的环向钢筋在这一阶段应力迅速增加并进入屈服阶段.在肋式转向装置达到极限荷载

时,转向装置由于受压混凝土劈裂而失去承载力.

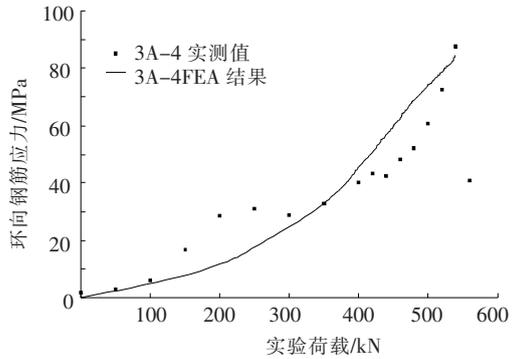


图 16 实测环向钢筋应力与 FEA 结果比较

4 结论

1)采用梁段模型和转向装置局部模型分别模拟分析转向装置对梁体的局部影响和转向装置受力至破坏的全过程是可行的.这种分析方法避免了在一个模型中并存多种非线性问题带来的计算量大、收敛性差等问题.

2)转向装置对结构的局部影响主要集中在梁体与转向块连接的部分及附近大小约为转向装置自身尺寸 2 倍的区域内.

3)混凝土肋式转向装置破坏时,受拉区混凝土受拉开裂、环向钢筋受拉屈服,受压区混凝土受压劈裂破坏.

4)肋式转向装置受压区混凝土的受力表现出偏心受压构件的受力特点,转向角度较大侧的混凝土受压较大.

参考文献:

[1] 杨明,孙筠,张树仁,等.波纹钢腹板体外预应力箱梁桥的发展与展望[J].公路交通科技,2006,23(12):72-75.
 [2] 杨明.波纹钢腹板箱梁桥转向装置和剪力连接件理论与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
 [3] SAYED-AHMED E Y. Behaviour of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(4): 656-672.
 [4] METWALLY A E, LOOV R E. Corrugated steel webs for prestressed concrete girders [J]. Materials and Structures, 2003, 36: 127-134.
 [5] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京:机械工业出版社,2006:64.
 [6] 庄茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南 [M]. 北京:清华大学出版社,2004:65,215.
 [7] 曹金凤,石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答 [M]. 北京:机械工业出版社,2009:277.

(编辑 赵丽莹)