

The Carrying Capacity Calculation and Finite Element Analysis to PBL Shear Key

Baochu Yu^{1,2*}, Yiqun Zhang¹, Yunlong Zhang¹

¹Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning

²State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning

Email: baochuyu@dlou.edu.cn, 334810347@qq.com

Received: Dec. 26th, 2014; accepted: Jan. 17th, 2015; published: Jan. 22nd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In view of PBL shear key playing an increasingly important role in all aspects of civil engineering, we firstly analyze and discuss the theoretical formula, then make model with MIDA FEA. Displacement stress from static load had been analyzed and compared. At last, PBL shear bond stress at critical locations and displacement in different conditions is calculated. The calculation results show that: The model in the whole loading process, works in a good condition with no obvious damage phenomenon, and the carrying capacity has a large safety margin.

Keywords

PBL Shear Key, Carrying Capacity Calculation, Finite Element Analysis

PBL剪力键承载力计算与有限元分析

余报楚^{1,2*}, 张义群¹, 张云龙¹

¹大连海洋大学, 辽宁, 大连

²大连理工大学工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁, 大连

Email: baochuyu@dlou.edu.cn, 334810347@qq.com

收稿日期: 2014年12月26日; 录用日期: 2015年1月17日; 发布日期: 2015年1月22日

*通讯作者。

摘 要

认识到PBL剪力键在土木工程各方面发挥了越来越重要作用,先对其极限承载力理论计算公式做了简单分析和讨论,其次利用MIDAS FEA建立了有限元模型,对其静力荷载下位移应力等进行了分析比较,最后计算了在不同工况下PBL剪力键的关键位置处的应力和位移,计算结果表明:表明模型在整个加载过程中,工作状态良好,没有明显的破坏现象,承载力具有较大的安全储备。

关键词

PBL剪力键, 承载能力计算, 有限元分析

1. 引言

组合结构应用于桥梁工程以来,桥梁承载能力得到了很大提高,同时也大力促进了桥梁工程向大跨、高强方向的发展。其中,波纹钢腹板体外预应力PC组合箱梁桥融合了箱梁、体外预应力和组合结构的优点,正越来越受到国内外工程界的重视,很多专家也对此新型结构进行了探索和研究[1],国内学者利用大型有限元软件ANSYS对PBL剪力键进行了分析,分别就剪力键钢板及混凝土应力、模型应变和竖向变形、裂缝及破坏过程分析等三个方面做了较为详细的阐述。

PBL剪力键由带孔的钢板组成,可焊接在工字形截面的上翼缘,孔内可穿入钢筋。浇注混凝土后,孔内的混凝土形成一系列的混凝土棒状樨来抵抗钢构件和混凝土构件之间的竖向掀起,带孔的钢板主要抵抗水平剪力,能在钢与混凝土之间提供强大的连接作用,并具有很好的抗疲劳性能。很多研究表明,PBL剪力键无论在加工制作还是力学性能方面都比传统的剪力连接件有很大的优势[2]。目前国内外还没有规范对PBL键的形式、尺寸和承载能力作出规定[3],而PBL剪力键正是这种结构当中连接钢腹板与上下混凝土翼板的关键部件。因此,对PBL剪力键进行深入细致的分析就显的尤为必要。

2. PBL 剪力键承载力理论计算

鉴于剪力键受力情况复杂多变,所以必须在理论分析的基础上,对其进行大量规范化的试验分析。目前很多PBL键试验研究大多借鉴了栓钉连接件的推出试验方法,但试件的形式和尺寸差别较大。国际上对PBL键也没有规定统一的试件和试验标准。

PBL剪力键的极限承载力一般指的是开孔钢板上的单孔极限剪切力。影响其大小的因素很多,如混凝土强度、钢筋的屈服强度、贯穿钢筋直径、钢板开孔直径等等。对于理论计算,下面给出近期一些学者在试验基础得出的计算方法。

Perfobond Strip的剪力键设计公式[4]:

$$q_n = 2 \times (\pi D^2 / 4) \times 1.6 n f_{ck} \quad (1)$$

式中: q_n 为单孔极限承载力(KN/孔); D 为钢板开孔直径(mm); n 为钢板开孔个数; 1.6 为剪切强度系数; f_{ck} 为混凝土圆柱体抗压强度(MPa)。此公式要求提供贯穿钢筋,使之围绕孔对孔中混凝土施加约束,使其出于三向受力状态,有利于提高组合结构的整体工作性能。公式表明,单孔的抗剪强度由孔径尺寸和混凝土抗剪强度决定。其破坏模式包括混凝土抗剪销的承压破坏和孔洞间钢板的剪切破坏。

胡建华[5]等人在PBL剪力键承载力影响因素和计算公式研究中总结得出的剪力键承载力公式:

$$q_n = \alpha A_{tr} f_y + \beta A'_{tr} f'_y + \gamma A_c \sqrt{f_c} \quad (2)$$

式中, A_{tr} 为贯通钢筋面积(mm^2); A'_{tr} 为普通钢筋面积(mm^2); f_y 为贯通钢筋屈服强度(MPa); f'_y 为普通钢筋屈服强度(MPa); A_c 为混凝土榫面积(mm^2); f_c 为混凝土立方体强度(MPa); α 为钢筋影响系数, 取 $\alpha = 1.320125$; β 为横向普通钢筋影响系数, 当配筋率小于 0.18%, 取 $\beta = 1.042948$; γ 为混凝土榫影响系数, 取 $\gamma = 1.95168$ 。

石膏爽, 王清远等[6]在式子(1)基础上提出的改进型计算公式:

$$q_n = 2 \times \left(\pi D^2 / 4 \right) \times 1.6 n f_{ck} + 0.12 \frac{A_{tr} E_s}{A_{cc} E_c} f_y \quad (3)$$

式中: A_{cc} 为每个连接件所分配的受剪混凝土面积(mm^2); A_{tr} 为贯通钢筋截面总面积(mm^2); E_s 为贯通钢筋弹性模量(MPa); E_c 为混凝土弹性模量(MPa); f_y 为贯通钢筋屈服强度(MPa)。此公式考虑工程实用意义, 对唯一安全估算承载能力的式(1)做了进一步改进, 应用变形协调原理, 考虑横向钢筋抵抗滑移的能力, 同时考虑了 0.12 倍的剪切强度折减系数[6]。

运用以上公式对本文中的 PBL 剪力键模型进行承载力计算, 模型尺寸为深圳某大桥剪力键实际尺寸[6], 材料为 Q345qc 桥梁钢。其中混凝土抗压强度为 33.15 MPa, 贯通钢筋为 HPB235 ϕ 10, 剪力键钢材屈服强度为 420 MPa。计算结果如表 1 所示。

公式(3)是鉴于实验结果修正所得的公式, 一定程度上能够比较准确地接近实际情况, 这样的话, 从计算结果可以看出, Perfobond Strip 公式计算值偏小, 这是因为其所考虑的仅仅只有孔径内混凝土的作用, 低估了连接件的承载能力。胡建华等的公式得到的结果也比较准确, 能够反映实际情况, 这是因为该公式是在大量理论分析与试验基础上总结出来的, 与石膏爽, 王清远等的修正公式计算结果相差不大。

3. PBL 剪力键有限元分析

在有限元分析方面, 其有限元分析过程较为繁琐, 对于除其试验模型之外的剪力连接件计算没有很强的通用性, 目前尚没有利用 MIDAS-FEA 对 PBL 剪力键分析的先例。钢和混凝土复合结构有限元分析的最大的难点在于材料模型的准确描述。钢和混凝土复合结构是由钢和混凝土这样两种具有不同物理力学性能的材料组, 弹性模量 E 不是固定不变的, 在加载过程中, 当混凝土某一部分的应力超出其弹性范围后, 弹性模量就会随着应力的变化而变化, 材料的 σ - ε 曲线会变得很复杂。本模型在有限元计算中, 钢材取用 Q345 钢, 弹性模量为 $2.06 \times 10^8 \text{ g kN/m}^2$, 泊松比为 0.3; 混凝土标号为 C50, 弹性模量为 $3.45 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 泊松比为 0.2。

利用 MIDAS FEA 建立上文深圳某大桥剪力键有限元模型, 混凝土、开孔钢板和工字梁采用实体单元, 贯通钢筋采用钢筋单元, 工字梁与开孔钢板用实体布尔并集结合, 其与混凝土接触部分建立界面单元。整个模型采用自动划分网格, 在实体接触部分, 先进行实体分割, 其次对相互嵌套接触的实体用布尔差集处理, 然后对其接触线面部分进行线播种, 最后完成网格耦合操作。

有限元模型及网格划分如图 1 所示。

对以上模型进行线性静态分析, 在工字梁两端施加竖向荷载 500KN, 可以观察到各个关键点处位移和应力的变化。如图 2 所示。

在 MIDAS FEA 中, 利用后处理样式的一些操作, 可以观察到变形前后剪力键模型的直观变化, 另外可以标记出最大最小变形。如图 3 所示。

随着荷载变化, PBL 剪力键各个关键位置最大位移, 最大应力变化规律如图 4 所示。

由图 4 可见, 混凝土和钢板的最大位移呈现类三阶曲线变化趋势, 其拐点发生在荷载 250 KN 左右,

Table 1. Carrying capacity comparison results of PBL shear key
表 1. PBL 剪力键承载力比较

公式	Perfobond Strip	胡建华等	石膏爽, 王清远等
承载力编号	q_{n1}	q_{n2}	q_{n3}
计算结果	401 KN	443.87 KN	450.5 KN

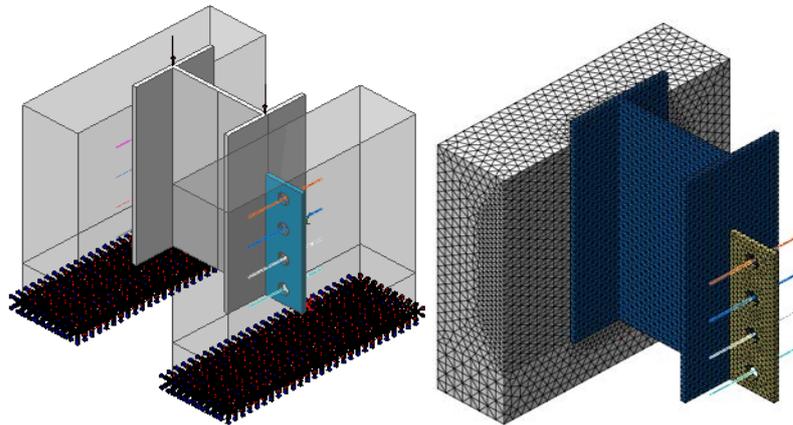


Figure 1. The finite element model and mesh map of shear key
图 1. 剪力键有限元模型及网格划分图

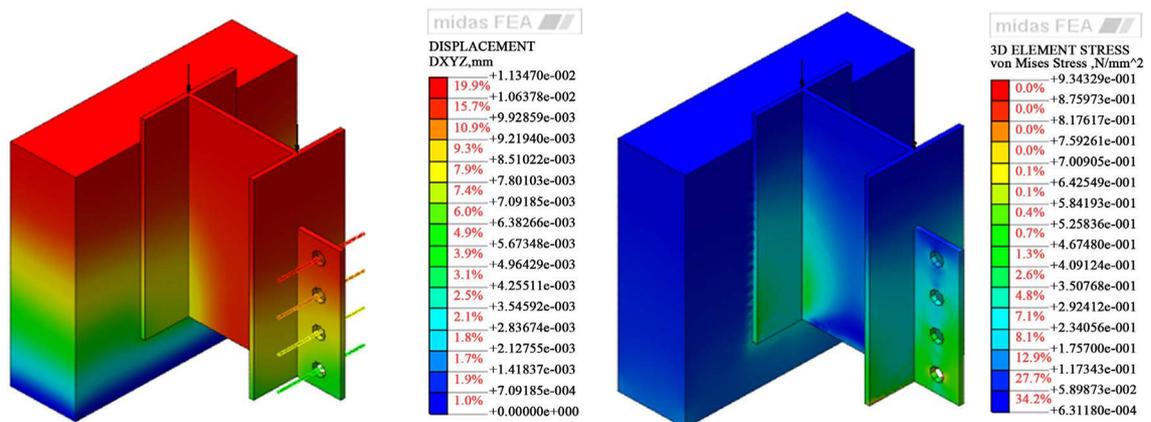


Figure 2. The displacement contours of PBL shear key and von Mises stress cloud
图 2. PBL 剪力键位移及范·梅塞斯应力云图

此时其位移变化率最高。混凝土榫和开孔钢板的最大 MISES 应力呈相同变化趋势, 不同点在于, 在 100 KN 以下时, 应力曲线基本重合。这是因为, 在较小的荷载作用下, PBL 剪力键与混凝土之间基本不存在滑移。因工字梁受集中点荷载作用, 在加载过程中, 工字梁受力点应力数值较大, 一定程度上制约最大荷载的增加, 当工字梁受力点应力达到 400 MPa 时, 停止继续加载。

4. 结语

PBL 剪力键在桥梁工程中发挥的作用越来越大, 对其进行深入研究很有必要。本文从两个方面对其进行了尝试性的讨论分析, 一是简要总结了 PBL 剪力键极限承载力的理论计算, 二是利用 MIDAS FEA 有限元软件对其应力和变形做了简单分析, 可以更加直观地认识到其内部应力应变分布变化规律。

运用不同的公式对 PBL 剪力键承载能力计算结果不同, 这主要是因为不同的公式考虑的影响因素不

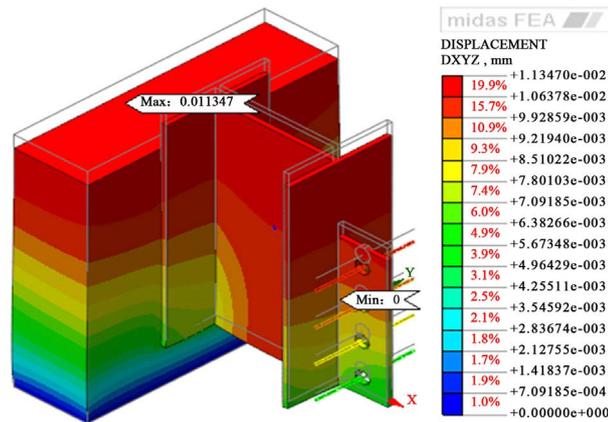


Figure 3. The comparison chart of PBL Shear before and after deformation
图 3. PBL 剪力键变形前后对比图

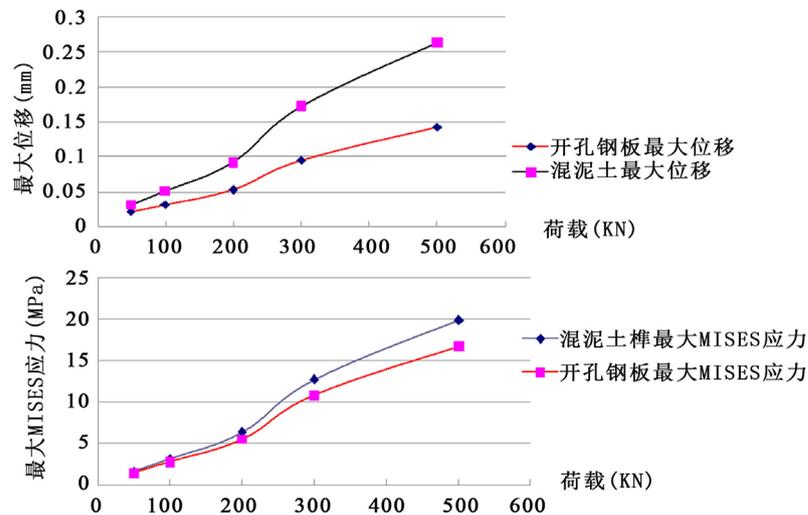


Figure 4. Maximum displacement and stress for some position under different load
图 4. 不同荷载下各位置最大位移和最大应力变化规律

同，即使考虑相同因素，由于试验误差的原因，对于公式的修正侧重也有所不同。鉴于没有通用的理论计算公式，这就要求在实际中对于 PBL 剪力键的分析必须理论与试验相结合，最终得到符合自身实际要求的修正计算公式。利用 MIDAS FEA 有限元软件对 PBL 剪力键进行分析，可以直观地了解其内部应力应变变化，跟通用软件 ANSYS 相比，FEA 操作简便，更容易快速得到有限元分析结果。

参考文献 (References)

- [1] Chen, B.C. and Huang, Q.W. (2005) A summary of application of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs. *Highway*, 45-53.
- [2] 宋建永, 张树仁, 王彤, 吕建鸣 (2004) 波纹钢腹板体外预应力组合梁弯曲性能分析及试验研究. *土木工程学报*, 37, 50-55.
- [3] Kraus, D. and Wurzer, O. (1997) Nonlinear finite element analysis of concrete dowels. *Computers & Structures*, 64, 1271-1279.
- [4] 孙筠 (2006) 波纹钢腹板体外预应力组合箱梁剪力连接件实验研究. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨.
- [5] 胡建华, 侯文崎, 叶梅新 (2007) PBL 剪力键承载力影响因素和计算公式研究. *铁道科学与工程学报*, 6.
- [6] 石膏爽, 王清远, 欧阳雯欣, 陈宣言 (2012) PBL 剪力连接件粘结滑移性能的静载推出试验研究. *工程力学*, 1.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

