

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202007030

剪扭复合作用下预制拼装混凝土桥干接缝抗剪强度分析*

王海良^{1,2}, 李搏瀚^{1,3}

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 建筑固体废弃物资源化利用技术国家地方联合工程研究中心, 天津 300384; 3. 天津城建设计院有限公司, 天津 300122)

摘要:为研究剪扭复合作用对单键齿干接缝抗剪强度影响,本文结合实际预制拼装混凝土桥剪力键尺寸与形状,利用ABAQUS有限元软件对干接缝剪力键受剪扭复合作用直至失效过程进行分析;研究过程首先以已有学者剪力键纯剪切试验为对象,建立其有限元模型,对比文献可以得出:数值模拟与试验得到的接缝位置抗剪强度比值平均为0.94,且数值模拟中裂缝位置与试验裂缝出现位置较为接近,裂缝演化过程较好吻合;在此基础上采用相同方法建立新数值模型,并通过改变荷载作用位置对剪力键施加剪扭复合作用,结果表明:单键齿干接缝抗剪强度随荷载所产生扭转作用增大而减小,扭转对剪力键抗剪强度降低幅度影响显著,当键齿厚度为400 mm,荷载偏移距离为275 mm,荷载移动距离为键齿厚度1/1.45时,抗剪强度较受纯剪切荷载模型减少超过40%;对60个剪扭复合作用模型抗剪强度降低值线性回归,得到偏载距 S 与抗剪强度减少系数 P 之间关系为 $P=1.758 \times 10^{-3}S-0.042$,依此对美国AASHTO规范中干接缝抗剪承载力预测计算式提出修改建议;通过另建立8个设置不同参数的剪扭复合作用模型验证修正后计算式准确性与一般性,数值模拟与修正计算式得到的抗剪强度比值平均为1.01,最大为1.06。

关键词:剪扭复合作用; 预制混凝土节段桥梁; 抗剪强度; 数值模拟; 干接缝; 剪切破坏

中图分类号: U441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0818-08

Shear Strength of Dry Joints in Precast Concrete Segmental Bridges under Shear-torsion Interaction

WANG Hailiang^{1,2}, LI Bohan^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Resource Utilization Technology of Construction Solid Wastes, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Urban Construction Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300122, China)

Abstract: In order to analyze the effect of shear-torsion interaction on the shear strength of single-keyed dry joints, a model of shear-torsion combined action of keyed dry joints was established based on ABAQUS finite element software. Firstly, some finite element models of pure shear tests of shear keys were established to prove the reliability of the modeling method. The results showed that the ratio of shear strength between the numerical simulation and the experiment was 0.94, the cracks locations of the simulation were close to those of experimental results, and the evolution of cracks was in

* 收稿日期:2020-07-30;修回日期:2021-02-08

基金项目:天津市科委轨道交通重大专项课题(18ZXGDGX00050)资助

作者简介:王海良(1966—),男,教授,硕士。主要从事桥梁工程检测与维修加固研究。E-mail:whl@tcu.edu.cn

good agreement. On this basis, a new numerical model was established by the same method, and the shear-torsion composite effect was exerted on these shear keys by changing the load position. The results showed that the shear strength of single-keyed dry joints decreased with the increase of torsion, and torsion had a significant effect on the shear strength reduction. When the thickness of the key was 400mm, the load offset distance was 275mm, and the load movement distance versus the thickness of the key was 1/1.45, shear strength was reduced by more than 40% compared with pure shear models. After linear regression on 60 shear-torsion composite models, the relationship between shear strength reduction factor P and offset load distance S was $P=1.758 \times 10^{-3}S-0.042$, and accordingly, a modification proposal was proposed for the prediction formula of shear capacity of dry joints in AASHTO. Eight shear-torsion composite models with different parameters were established to verify the accuracy and generality of the revised formula, and the ratio of shear strength obtained by numerical simulation and the modified formula was 1.01 on average and 1.06 on maximum.

Keywords: shear-torsion composite action; precast concrete segmental bridge; shear strength; FEM; dry joints; shear failure

0 引言

预制拼装混凝土桥因节段标准化,施工速度快,且对环境影响较小,已成为行业发展主流方向;与现浇桥梁相比,该结构突出特点为纵向存在拼接接缝,除湿接缝外,接缝处因钢筋不连续等因素成为结构薄弱部分,接缝位置应合理设计^[1],拼装节段间剪力主要通过接缝处剪力键传递,该部位抗剪承载力一定程度上决定了该类桥梁整体力学性能;环氧树脂胶接缝和干接缝都有用于预制拼装混凝土桥建造实例,现有试验结果表明,环氧树脂胶接缝比干接缝具有更好的受力性和耐久性^[2-6],然而胶接缝破坏位置为环氧树脂附近混凝土,并非键齿区域^[7],无法反映键齿抗剪强度;干接缝剪力键破坏位置多发生在键齿根部^[5-6,8],能够反映键齿抗剪强度与破坏情况。

近年来,许多学者开展了干接缝抗剪强度与破坏的试验与数值模拟^[8-17],研究中考虑了键齿数、正应力等因素对受纯剪切荷载剪力键影响;以往研究中,关于剪力键受复合荷载作用研究较少,且主要集中于弯剪复合作用对抗剪强度与破坏影响研究^[18-20];然而,实际桥梁在使用过程中,上部荷载并非仅作用于键齿正上方,多数情况下荷载会对接缝产生弯、剪、扭等复合作用,如图1所示为上部荷载 F 在接缝位置产生剪力(T)和扭矩(N)。

关于剪扭复合作用,M. A. Algorafi等^[21]试验结果表明扭转对桥梁结构性能有显著影响,但是其提

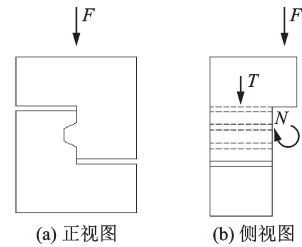


图1 荷载对接缝产生剪扭复合作用

Fig.1 The shear-torsion composite effect is produced by the load on the joint

出的计算式^[22]中并未体现该影响;Z. Huang等^[23]提出一种修正的斜弯模型,用于计算节段箱梁在扭转、弯曲和剪切作用下的极限承载力,但其研究中并未分析接缝与剪力键抗剪破坏。综上所述,实际桥梁使用过程中受扭情况很多,对位于平曲线桥梁、宽幅桥梁等结构,这种扭转效应可能会加剧;荷载作用位置偏离中心产生的扭转效应对干接缝剪力键抗剪强度降低作用显著^[21],但目前缺乏偏离距离与剪力键抗剪强度降低幅度间关系量化研究,为此,本文开展了剪扭复合作用下干接缝抗剪强度研究,希望对该结构进一步推广应用起到借鉴作用。

1 建模方法与结果验证

1.1 混凝土本构关系

本研究采用ABAQUS中混凝土塑性损伤模型定义混凝土材料^[12],模型的剪胀角、偏心率和黏性参数分别为 36° 、0.1和0.000 5,混凝土在单、双轴状

态下强度之比为 1.16。

混凝土在单轴受拉、压作用下性能等参数按照我国《混凝土结构设计规范》^[24]确定,其中混凝土单轴受拉的应力—应变关系可按如下公式计算:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}, \quad \rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (3)$$

式中, E_c 为混凝土弹性模量; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度; α_t 为混凝土单轴受拉应力—应变曲线下降段参数值; $\varepsilon_{t,r}$ 为与 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

混凝土单轴受压的应力—应变曲线可按如下公式计算:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (4)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}}, \quad n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}}, \quad x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (6)$$

式中, $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度; α_c 为混凝土单轴受压应力—应变曲线下降段参数值; $\varepsilon_{c,r}$ 为与 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

本文采用 R. Shamass 等^[12]文中所假定的混凝土受拉应力—应变关系,即总应变为拉应变的 10 倍时,混凝土丧失抗裂性能。

1.2 分析对象

本文基于 X. Zhou 等^[5]和 O. Buyukozturk 等^[6]抗剪强度试验,建立单键齿干接缝模型,通过不同尺寸剪力键抗剪强度试验结果和数值分析对比,验证本文干接缝抗剪强度建模数值分析方法的正确性。X. Zhou 等^[5]试验中单键齿干接缝试件总体尺寸为 500 mm × 620 mm × 250 mm,键齿深度 50 mm,每组包括含键齿部分与含键槽部分两个试件(图 2)。混凝土部分采用八节点线性六面体单元,减缩积分,沙漏控制(C3D8R),钢筋部分采用两节点线性三维桁架单元(T3D2)。为简便描述,试件按 X. Zhou 等^[5]试验测试的格式列出,即 Mi-D-Km-n,其

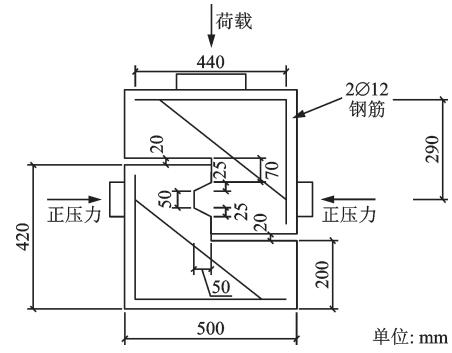


图 2 X. Zhou 等^[5]单键齿试件尺寸

Fig.2 Dimensions of single key specimen tested by X. Zhou et al^[5]

中 M 表示对试件施加正压力所产生的正应力, i 表示正应力数值, D 表示接缝类型为干接缝, K 表示接缝处键齿, m 为键齿数, n 表示相同测试条件下不同试验。

在 O. Buyukozturk 等^[6]试验中,单键齿干接缝试件总体尺寸为 533.4 mm × 251 mm × 76.2 mm,键齿深度 31.75 mm,每组包括两个试件(图 3)。单元类型与上文对 X. Zhou 等^[5]模型处理相同。采用 O. Buyukozturk 等^[6]的描述方法区别不同参数试件,即 Keyed dry-mMPa,其中 Keyed 表示键齿试件, dry 表示干接缝, m 为施加在试件两侧压力所产生正应力数值。

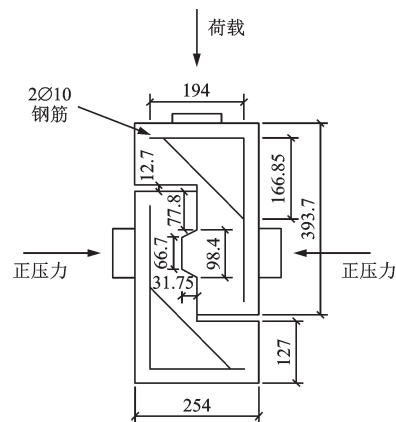


图 3 O. Buyukozturk 等^[6]单键齿试件尺寸

Fig.3 Dimensions of single key specimen tested by O. Buyukozturk et al^[6]

1.3 接触设置

对于每组两试件模型之间接触关系,采用结点—表面法对模型间接触面进行设置,与地面相关模型(含键槽试件)上接触面设置为主表面;混凝土间法向行为选择“硬接触”,即接触面间可以完全传递接

触压力作用,当接触面压力不大于0时接触面发生分离;切向行为设置摩擦系数,R. Shamass等^[12]根据X. Zhou等^[5]、O. Buyukozturk等^[6]试验结果推导出其混凝土间摩擦系数分别为0.72和0.67。

整个加载直至剪力键破坏过程中,钢筋应力远低于其屈服强度,本文采用理想弹塑性模型对钢筋进行定义,钢筋屈服强度、弹性模量和泊松比分别为400 MPa、210 GPa和0.33。钢筋设置为嵌入区域,混凝土部分为主区域,将钢筋嵌入相对应混凝土模型内。设置X. Zhou等^[5]和O. Buyukozturk等^[6]模型中钢筋分别为2Φ12和2Φ10,O. Buyukozturk等^[6]在文中未明确给出钢筋准确位置,为不失一般性,假设混凝土保护层厚度为30 mm,钢筋布置位置分别如图2、图3所示。

1.4 边界条件与外加荷载

在数值分析中,模型与地面接触底面的所有平动自由度予以约束,正压力为施加于模型两侧恒定、均匀压力,在X. Zhou等^[5]单键齿干接缝试件上该压力产生的正应力为1、2、3、4、4.5 MPa,压力荷载作用范围为200 mm×250 mm;O. Buyukozturk等^[6]试件上两侧压力产生的正应力为0.69、2.07、3.45 MPa,压力荷载作用范围为254 mm×76.2 mm,有限元模型网格划分及边界设置与施加荷载区域如图4所示。

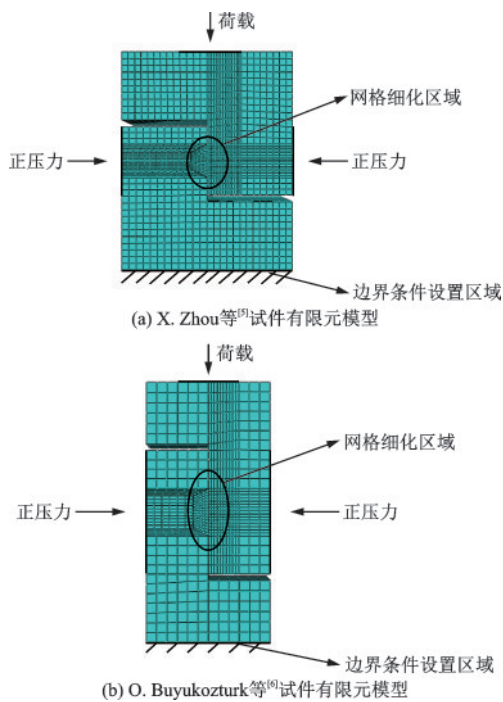


图4 有限元模型网格、边界及施加荷载

Fig.4 Mesh, boundary and applied load of finite element model

1.5 有限元分析与试验结果对比

验证的主要内容为试件抗剪强度与裂缝演化情况,数值模拟得到12个单键齿干接缝有限元模拟抗剪强度结果,该结果与X. Zhou等^[5]、O. Buyukozturk等^[6]试验所得抗剪强度及两者比值见表1,可以看出,各试件试验实测及模拟结果比值平均为0.94。

表1 单键齿干接缝抗剪强度试验值与模拟值比较
Table 1 Comparison of experimental and numerical values of ultimate shear strength of single-keyed dry joints

试件编号	f'_c / MPa	试验试件	数值模拟试	V_u/V_e
		抗剪强度 V_e /kN	件抗剪强度 V_u /kN	
M1-D-K1-1	38.7	193	202.3	1.05
M1-D-K1-2	50.0	211	225.8	1.07
M2-D-K1-1	56.2	335	293.1	0.87
M2-D-K1-2	59.6	337	299.3	0.89
M3-D-K1-1	80.1	448	376.2	0.84
M3-D-K1-2	48.8	360	329.2	0.91
M4-D-K1-2	37.1	354	346.9	0.98
M4-D-K1-2	36.7	392	345.8	0.88
M4.5-D-K1-1	37.7	375	366.2	0.98
Keyed dry-0.69 MPa	48.4	66	63.3	0.96
Keyed dry-2.07 MPa	47.6	84	81.4	0.97
Keyed dry-3.45 MPa	49.4	111	99.1	0.89
平均比值				0.94

选取试件M4.5-D-K1-1研究裂缝演化情况,如图5所示,图中阴影区域为数值模拟混凝土产生裂缝位置,白色线为X. Zhou等^[5]试验测得裂缝位置。X. Zhou等^[5]试验结果表明,裂纹最先形成于键齿根

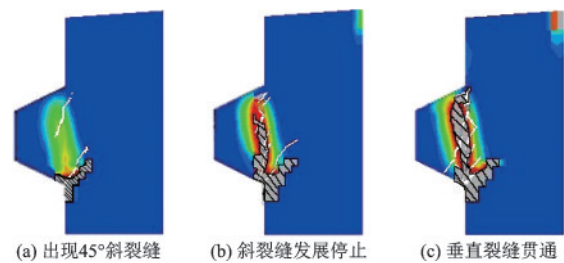


图5 有限元裂缝演化过程与X. Zhou等^[5]试验对比
Fig.5 Comparison of crack pattern by numerical simulation and X. Zhou et al^[5]

底部,以近似45°斜向上发展,随后斜裂缝发展停止并于键齿根部出现垂直裂缝,垂直裂缝竖向发展至贯通时键齿被剪断。从图5可以看出计算模拟裂缝位置与文献[5]中试验裂缝位置较为接近,计算模拟裂缝演化和试验裂缝发展过程可较好吻合。抗剪强度及裂缝演化情况对比均表明,采用本文方法计算结果和试验结果比较接近,也证明本文建模方法的可靠性。

2 剪扭复合作用模型

2.1 模型尺寸

为研究剪扭复合作用下剪力键抗剪强度,在验证本文建模方法可靠性基础上,开展如图6所示模型在剪扭复合作用下抗剪强度数值分析,模型厚度为400 mm,含键齿试件非接缝区域厚度额外增加200 mm,为上部荷载提供移动空间,模型中混凝土与钢筋所采用单元类型与本文1.2节所述方法一致。

2.2 混凝土与钢筋材料性能

所有剪扭复合作用模型均设置为表1中M4.5-D-K1-1材料数据,钢筋屈服强度、弹性模量和泊松比与本文1.3节所述一致,布置位置如图6所示,沿试件宽度方向的水平钢筋为 $\Phi 12$,其余均为 $\Phi 14$;混凝土接触设置、钢筋嵌入混凝土处理方式与本文1.3节一致。

2.3 正压力、上部荷载设置

正压力作用范围 $200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,压力所产生正应力为 $1 \sim 5\text{ MPa}$,以 1 MPa 为梯度,上部荷载施加范围为 $200\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ (图7),范围中心点位于接缝正上方一半键齿厚位置时,试件受纯剪切作用,通过作用范围沿键齿厚度方向距离(以下简称偏载距)控制荷载产生扭矩大小;偏载距为 $0 \sim 275\text{ mm}$,以 25 mm 为梯度,当其为0时中心点未移动,为 275 mm 时移动距离达到最大值,此时移动距离为键齿厚度的 $1/1.45$;为方便描述,采用Mi-D-Sj表示不同参数试件,其中M、i、D含义与X. Zhou等^[5]相同,S表示偏载距,j为偏载距数值。

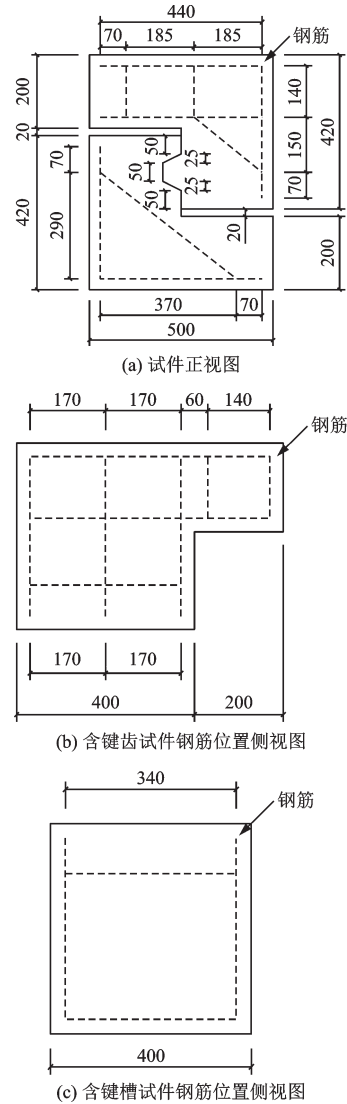


图6 剪扭复合作用模型及钢筋布置

Fig.6 Model of shear-torsion combined action and arrangement of reinforcing bar

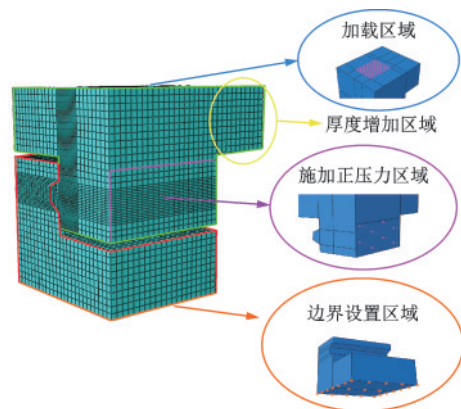


图7 剪扭复合作用模型

Fig.7 Finite element model of shear-torsion combined action

2.4 数值分析结果与讨论

将剪扭作用模型破坏时抗剪强度列于表2中,可看到相同偏载距下,随着正压力增加其产生的正应力也有所增加,并且提升了模型抗剪强度,这与已有正应力对抗剪强度影响结论一致;正压力等约束使得开裂混凝土表面间存在摩擦,摩擦使接缝部位能够在键齿破坏后仍保持部分强度^[12];当正压力所产生正应力相同时,模型抗剪强度随偏载距增加不断下降,当键齿厚度为400 mm,荷载偏移距离为275 mm,荷载移动距离为键齿厚度1/1.45时,抗剪强度较受纯剪切荷载模型减少超过40%,说明扭转作用对剪力键抗剪强度削弱影响显著;以偏载距S分别取125 mm、200 mm和275 mm,得出剪扭复合作用模型在不同正应力下的荷载—位移曲线(图8),可以看出,偏载距相同时,正压力越大荷载峰值对应垂直位移越大。美国AASHTO规范^[25]中给出了受纯剪作用干接缝剪力键抗剪承载力预测计算式为:

$$V_j = (12 + 2.466\sigma_n) A_k \sqrt{6.792 \times 10^{-3} f'_c + \mu A_{sm} \sigma_n} \quad (7)$$

式中, A_k 为接缝面上键齿根部面积(m^2); f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度(MPa); σ_n 为正压力在接缝面上产生的正应力(MPa); A_{sm} 为接触面上摩擦接触的面积(m^2); μ 为接触面摩擦因数。关于 μ ,本文剪扭复合作用模型均以X. Zhou等^[5]试件为原型,故取 $\mu = 0.72$ 。

表2 剪扭作用模型抗剪强度

Table 2 Shear strength of shear-torsion models

S/mm	抗剪强度/kN				
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa
0	329.8	412.3	500.5	584.3	648.2
25	327.7	409.7	496.5	580.2	644.0
50	320.7	400.8	485.0	561.4	625.6
75	310.0	387.4	467.3	538.3	600.6
100	296.1	370.1	443.3	510.1	569.0
125	280.8	350.5	418.8	480.4	535.4
150	265.0	328.7	392.8	450.6	502.8
175	248.9	308.5	368.9	422.5	469.7
200	231.2	288.2	344.9	394.3	438.2
225	211.2	268.8	317.2	359.9	399.3
250	196.3	250.8	298.8	339.4	374.4
275	179.3	234.8	282.0	320.9	355.3

注:表中1~5 MPa为施加于模型上正压力所产生正应力,下同

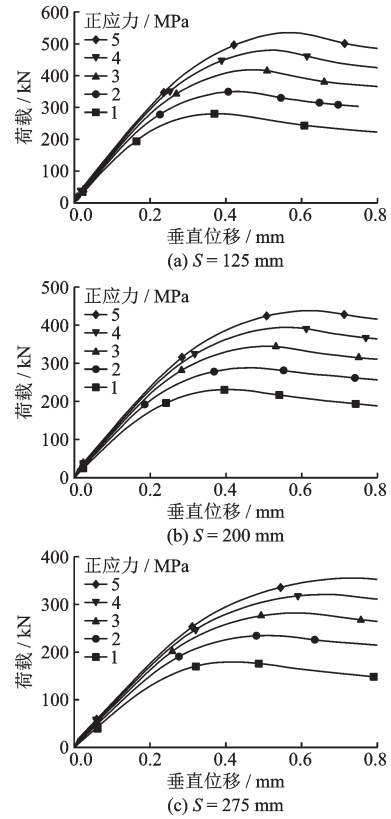


图8 同偏载距S剪扭作用模型荷载—垂直位移曲线

Fig.8 Load-vertical displacement curve of shear-torsion model with same S

由式(7)可以计算得到剪扭复合作用模型受纯剪切荷载($j=0$)时试件抗剪强度,计算值与模拟值结果见表3,两者比值平均为0.97,说明AASHTO公式对分析模型在纯剪切作用时抗剪强度预测较好,且偏于保守。式(7)中干接缝承载力可分为两部分:键齿抵抗力和接缝面摩擦力,但其中未考虑荷载产生扭转对抗剪强度影响。

表3 纯剪作用计算结果与AASHTO公式抗剪强度对比

Table 3 Comparison of calculation results of pure shearing action:AASHTO versus numerical

试件编号	数值模拟试件	AASHTO公式计算	V_a/V_f
	抗剪强度 V_f /kN	抗剪强度 V_a /kN	
M1-D-S0	329.8	321.6	0.98
M2-D-S0	412.3	400.3	0.97
M3-D-S0	500.5	479.0	0.96
M4-D-S0	584.3	557.7	0.95
M5-D-S0	648.2	636.5	0.98
平均比值			0.97

荷载产生的扭矩,对接缝部位抗剪强度具有削弱作用,即接缝抗剪承载力在抵抗剪切作用时,还需要部分用来抵抗扭转,为确定扭转作用对于抗剪强度削弱程度,需得到偏载距与抗剪强度间关系。通过表2计算正应力相同时各偏载距抗剪强度减少值,将减少值与偏载距为0模型抗剪强度比值列入表4,该比值视为抗剪强度减少系数,记为 P ,离散度最大为0.132,说明由正压力所产生正应力的改变对 P 影响不明显。通过对数据进行线性回归分析,得出偏载距 S 与承载力减少系数 P 之间关系为:

$$P = 1.758 \times 10^{-3} S - 0.042 \quad (8)$$

该回归分析中线性相关系数 $R=0.994$,决定系数 $R^2=0.988$,说明 P 与 S 具有高度线性相关性;所得回归分析 P 值为0.00,小于显著性水平0.01,说明回归分析结果与 P - S 曲线拟合度较好。故模型在考虑剪扭复合作用抗剪强度计算式如式(9)所示。

按照本文建立剪扭复合作用模型方法,另建立8个剪扭复合作用下梯形剪力键数值模型,这些模型设置不同材料参数、正压力所产生正应力与键齿尺寸,以验证式(9)抗剪强度预测准确性和一般性,模型具体参数、模拟结果与式(9)计算结果见表5,计算与模拟抗剪强度比值平均为1.01,最大为1.06,说明式(9)对于这8个模型结果预测较好。

表4 剪扭复合作用抗剪强度减少系数 P 值

Table 4 Reduction factor of shear - torsion composite action P

S/ mm	P					平均值	离散度
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa		
0	0	0	0	0	0	0	0
25	0.006	0.006	0.008	0.007	0.006	0.007	0.121
50	0.028	0.028	0.031	0.039	0.035	0.032	0.132
75	0.060	0.060	0.066	0.079	0.073	0.068	0.110
100	0.102	0.102	0.114	0.127	0.122	0.114	0.090
125	0.149	0.150	0.163	0.178	0.174	0.163	0.073
150	0.196	0.203	0.215	0.229	0.224	0.214	0.058
175	0.245	0.252	0.263	0.277	0.275	0.262	0.048
200	0.299	0.301	0.311	0.325	0.324	0.312	0.035
225	0.360	0.348	0.366	0.384	0.384	0.368	0.038
250	0.405	0.392	0.403	0.419	0.422	0.408	0.027
275	0.456	0.431	0.437	0.451	0.452	0.445	0.022

$$V_{co} = (1 - P)V_j = (1.042 - 1.758 \times 10^{-3} S) \left[(12 + 2.466\sigma_n) A_k \sqrt{6.792 \times 10^{-3} f'_c + \mu A_{sm} \sigma_n} \right] \quad (9)$$

式中, μ 为接触面摩擦因数,由前文所述取 $\mu=0.72$; V_{co} 为虑剪扭复合作用抗剪强度值;其他字母含义与式(7)和式(8)一致。

表5 不同参数下修正公式与数值模拟结果对比

Table 5 Comparison of results with different parameters:modified formula versus numerical

模型编号	模型参数					数值模拟试件抗 剪强度 V_u /kN	计算抗剪强 度 V_c /kN	V_c/V_u
	σ_n /MPa	f'_c /MPa	S /mm	A_k /m ²	A_{sm} /m ²			
1	3	40	150	0.04	0.04	399.7	382.0	0.96
2	4	50	225	0.04	0.04	396.1	403.9	1.02
3	5	50	275	0.04	0.04	383.1	397.2	1.04
4	2	35	125	0.03	0.03	249.9	239.2	0.96
5	1	35	225	0.03	0.03	146.4	150.7	1.03
6	4	35	175	0.03	0.03	302.1	298.3	0.99
7	3	50	200	0.056	0.04	407.5	433.6	1.06
8	4	40	175	0.056	0.04	524.9	553.2	1.05
平均比值								1.01

3 结 论

本研究旨在建立剪扭复合作用下接缝抗剪强度数值计算模型,分析剪扭复合作用对干接缝单键齿剪力键抗剪强度影响,得出以下结论:

(1)数值模拟所得纯剪切作用模型抗剪强度与X. Zhou等^[5]、O. Buyukozturk等^[6]试验所得抗剪强度比值平均为0.94,模拟裂缝演化过程与试验相吻合,且裂缝位置较为接近,验证了本文建模方法的可靠性。

(2)美国AASHTO规范^[25]计算式可较好预测

受纯剪切荷载干接缝剪力键模型抗剪强度,但其中并未考虑扭转影响,经分析得出偏载距 S 与剪力键承载力减少系数 P 之间关系为 $P=1.758 \times 10^{-3}S - 0.042$,修正后的公式可较好反映剪扭复合作用下剪力键抗剪强度计算结果。

(3)荷载产生的扭矩对剪力键抗剪强度削弱作用显著,数值分析中当键齿厚度为400 mm,荷载偏移距离为275 mm,荷载移动距离为键齿厚度1/1.45时,抗剪强度较受纯剪切荷载模型减少超过40%;增加正压力可以提高其产生的正应力,并能明显提高接缝抵抗纯剪与剪扭作用能力,但不会改变扭转作用造成的抗剪强度减少比例;偏载距相同时,正压力产生的正应力越大荷载峰值对应垂直位移越大。

参考文献:

- [1] Issa M A, Abdalla H A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3):315-324.
- [2] Ghafur H A, Omar Q A. Shear behavior of dry and epoxied joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading [J]. Engineering Structures, 2019, 182:89-100.
- [3] 李国平,胡皓,任才,等.桥梁混凝土结构接缝的耐久性能[J].土木工程学报,2018,51(7):98-103.
Li G P, Hu H, Ren C, et al. Study on durability of joints in concrete bridge structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7):98-103. (in Chinese)
- [4] 卢文良,杨雷,郑强.节段预制胶拼构件轴拉强度试验研究[J].铁道标准设计,2019,63(10):89-92.
Lu W L, Yang L, Zheng Q. Experimental study on axial tensile strength of precast segmental concrete members [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(10):89-92. (in Chinese)
- [5] Zhou X M, Mickleborough N, Li Z J. Shear strength of joints in precast segmental bridges [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(1):3-11.
- [6] Buyukozturk O, Bakhroum M M, Michael B S. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12):3380-3401.
- [7] 孙雪帅. 预制拼装桥梁节段间接缝抗剪性能试验研究 [D]. 南京:东南大学,2015.
Sun X S. Experimental study on shear behavior of joints in precast segmental bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [8] Jiang H B, Wei R B, Ma Z J, et al. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete dry joints in precast segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11):04016085.
- [9] Alcalde M, Cifuentes H, Medina F. Influence of the number of keys on the shear strength of post-tensioned dry joints [J]. Materiales De Construccion, 2013, 63(310):297-307.
- [10] Liu T X, Wang Z, Guo J, et al. Shear strength of dry joints in precast UHPC segmental bridges: experimental and theoretical research [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(1):04018100.
- [11] 姜海波,李宇鸿,肖杰,等.预制节段干接缝体外预应力混凝土简支梁抗剪性能试验[J].中国公路学报,2018,31(12):188-195.
Jiang H B, Li Y H, Xiao J, et al. Shear behavior of precast concrete segmental simply supported beam with external tendons and dry joints [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):188-195. (in Chinese)
- [12] Shamass R, Zhou X M, Alfano G. Finite-element analysis of shear-off failure of keyed dry joints in precast concrete segmental bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(6):04014084.
- [13] 袁爱民,赵雪茹,陆荣伟.纤维高强混凝土干接缝剪切性能试验研究[J].中国公路学报,2020,33(8):159-168.
Yuan A M, Zhao X R, Lu R W. Experimental investigation on shear performance of fiber reinforced high-strength concrete dry joints [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8):159-168. (in Chinese)
- [14] Kim M S, Lee Y H. Structural behavior of spliced post-tensioned girders with precast box segments [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019, 13(1):04016085.
- [15] Kim Y J, Chin W J, Jeon S J. Interface shear strength at joints of ultra-high performance concrete structures [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(6):767-780.
- [16] Gopal B A, Hejazi F, Hafezolghorani M, et al. Numerical analysis and experimental testing of ultra-high performance fibre reinforced concrete keyed dry and epoxy joints in precast segmental bridge girders [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2019, 11(4):463-472.

(本文编辑:池营营)

(下转第 853 页)