

基于 DIC 的预应力节段拼装桥墩 变形成分分析

王东升^{1,2}, 陈贺^{1,2}, 李俭涛^{1,2}, 付建宇^{1,2}, 葛笑^{1,2}

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要 目的 研究预应力节段拼装桥墩整体变形成分及组成, 为该类桥墩变形能力及抗震性能分析提供参考。方法 在拟静力试验基础上, 基于数字图像相关法(DIC)对配置不锈钢和普通耗能钢筋的预应力节段拼装桥墩的变形分量进行量测计算, 并分析节段拼装桥墩整体变形组成。结果 节段拼装桥墩整体变形中底接缝转动占比从最初的40%左右可达最后的85%; 第二接缝也存在转动, 在试验的后期占比可达到5%~10%; 节段拼装桥墩弯曲变形及接缝滑移变形对墩顶位移影响随位移角增大而减小, 前者占比分别从15%降至5%, 后者从10%降至约5%; 剪切变形对墩顶位移影响随位移角增大基本可以忽略。结论 节段拼装桥墩墩顶位移主要由接缝转动贡献, 其他变形成分与接缝转动相比影响较小。

关键词 节段拼装桥墩; 拟静力试验; 数字图像相关法; 变形成分; 接缝转动

中图分类号 TU378.1; U443.22

文献标志码 A

Deformation Component Analysis of Prestressed Segmental Bridge Piers Based on DIC

WANG Dongsheng^{1,2}, CHEN He^{1,2}, LI Jiantao^{1,2}, FU Jianyu^{1,2}, GE Xiao^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401; 2. Civil Engineering Technology Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401)

Abstract: In order to provide references for the analysis of the deformation capacity and seismic performance of prestressed segmental bridge piers, the integral deformation component and the component of prestressed segmental piers was studied. Based on pseudo-static test, measured and calculated each deformation component of segmental bridge piers with stainless steel bars and ordinary steel bars by Digital Image Correlation (DIC), and analyzed the integral deformation of

收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778206)

作者简介: 王东升(1974—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事桥梁及结构工程抗震等方面研究。

unbonded prestressed segmental bridge piers. The results show that the proportion of bottom joint rotation in the integral deformation of segmental bridge piers can reach from the initial 40% to the final 85%; The second joint also has rotation, finally can reach 5% ~ 10%; The influence of bending deformation and sliding deformation on the pier top displacement decreases with the drift ratio increasing; The shear deformation on pier top displacement can be ignored with the drift ratio increasing. The pier top displacement of segmental bridge piers is mainly contributed by joint rotation, other deformation components have less effect than joint rotation.

Key words: segmental bridge piers; pseudo-static test; digital image correlation; deformation component; joint rotation

节段拼装桥墩近年来在国内外桥梁建设中被关注,具有施工方便、节能环保和便于维护等优点^[1-4]。考虑建设地域的广泛适用性,其在地震作用下的力学性能及变形特点被国内外学者所关注^[5-6],近年来发展了以配置耗能钢筋消耗能量和通过预应力筋提供一定自复位能力的无黏结预应力节段拼装桥墩。抗震变形能力是桥墩重要的抗震性能评价指标,传统(现浇)桥墩在地震荷载作用下会产生弯曲变形、剪切变形和滑移变形(纵筋拔出),节段拼装桥墩因(干)接缝的存在,除上述外还存在接缝张开造成的变形影响,导致该类桥墩变形成分组成及占比与现浇桥墩有较大不同。

目前国内外学者对现浇桥墩整体变形成分研究表明^[7-10],现浇桥墩发生弯曲破坏时,弯曲变形对墩顶位移贡献平均可达50%以上,滑移变形平均25%~40%左右,剪切变形通常不足5%。尽管国内外对预制节段拼装桥墩的抗震性能研究较多,但对其整体地震变形成分的定量性研究涉及较少。王志强等^[11]通过拟静力试验证明,预制拼装桥墩损伤主要集中于承台与桥墩间接缝处。葛继平等^[12]认为节段拼装桥墩主要变形集中于接缝附近。高婧等^[13]通过试验证明节段拼装桥墩墩身曲率主要集中于墩底接缝处。Z. Y. Bu等^[14]试验证明在位移角达到7%时,节段拼装桥墩接缝处转动变形对墩顶位移贡献平均可达60%以上。传统的桥墩变

形测量方法是采用位移计方式,位移计布置数量受到试验空间制约,且操作繁琐在试验过程中易被扰动,从而影响测量结果。数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)采用无接触的测量形式,可有效避免传统接触式传感器测点少、布置难和采集困难等问题^[15]。学者们在金属材料断裂和混凝土构件开裂等试验中验证了DIC技术的准确性^[16-18]。笔者在无黏结预应力节段拼装桥墩拟静力试验过程中采用DIC方法,测量了水平加载过程中桥墩的空间变形及应变分布情况,进而研究桥墩各变形成分及整体变形组成,通过对桥墩整体变形分析明确了底部接缝转动等不同变形分量对墩顶水平位移的贡献。

1 试验

1.1 试件设计

4根矩形空心桥墩试件截面宽×高为450 mm×450 mm,壁厚110 mm,净保护层20 mm,每根桥墩试件由4个节段和加载端拼装而成,桥墩试件加载高度2 000 mm。试件主要参数见表1,试件尺寸和截面参数如图1所示。桥墩试件预应力筋均配置8根公称直径15.2 mm的7股钢绞线,分四孔对称布置,每孔两根。其中不锈钢钢筋试件的耗能钢筋、纵筋和箍筋均采用B1.4362不锈钢钢筋配置;普通钢筋试件的耗能钢筋和纵筋均采用HRB500E钢筋配置,箍筋采用HRB400E钢筋配置。材料力学参数见表2。

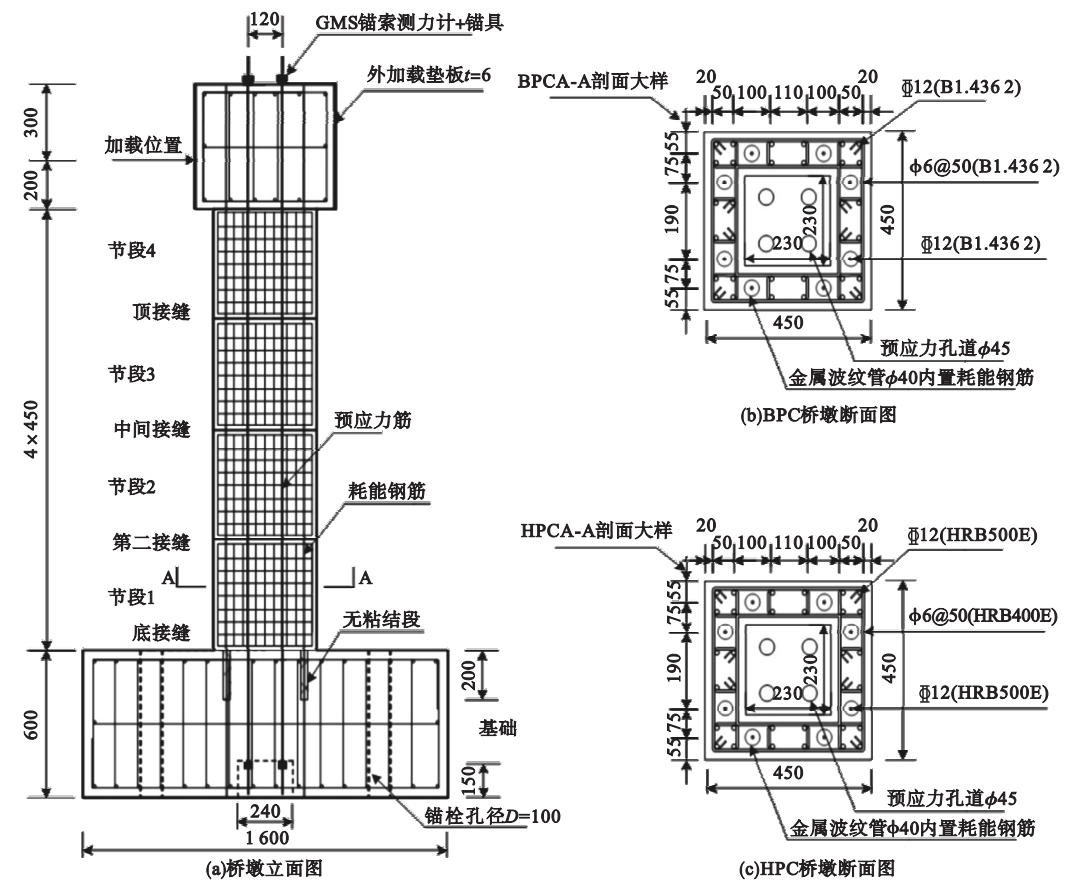


图 1 试件尺寸设计

Fig. 1 Design size of test specimens

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of test specimens

试件编号	耗能钢筋			预应力筋		恒载轴压比
	B1. 4362	HRB500E	配筋率 $\rho_{ED}/\%$	预应力度 η_p	数量	η_F
BPC1	8D12	—	0.6	0.1	8A15.2	0.10
BPC2	8D12	—	0.6	0.1	8A15.2	0.15
HPC1	—	8D12	0.6	0.1	8A15.2	0.10
HPC2	—	8D12	0.6	0.1	8A15.2	0.15

表 2 材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of materials

材料类型	弹性模量 E_s/GPa	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa
B1. 4362	184	553	767
HRB500E	232	543	712
C55 混凝土	—	—	58
高强无缝收缩料	—	—	59

1.2 DIC 测点布设

DIC 通过光照射在被检测区域的油漆散斑点图案,将其在试件加载过程中拍摄的动态图像绘制成各位置随连续帧数间变化的情况,从而观察检测区域的变形状态,其原理如图 2(a)所示。本次试验中 DIC 测点布设见图 2(b),各标识点用于分析数据使用,标识点间距为 50 mm,分布高度和分布宽度分别为 600 mm 和 450 mm。其中分析时选取 P0、

P36 及 P72 用作底接缝转动变形和墩底滑移变形分析;P7 和 P10、P43 和 P45 以及 P79 和 P81 用作第二接缝转动变形和滑移变形分析,以防第二接缝处标识点由于接缝张开等无法识别及影响数据采集精度;选取 P0 ~ P11(扣除 P8 和 P9)、P36 ~ P47(扣除 P44 和 P45)及 P72 ~ P83(扣除 P80 和 P81)用作桥墩节段的弯曲变形分析;选取 P37、P39 及 P43 用作桥墩节段的剪切变形分析。

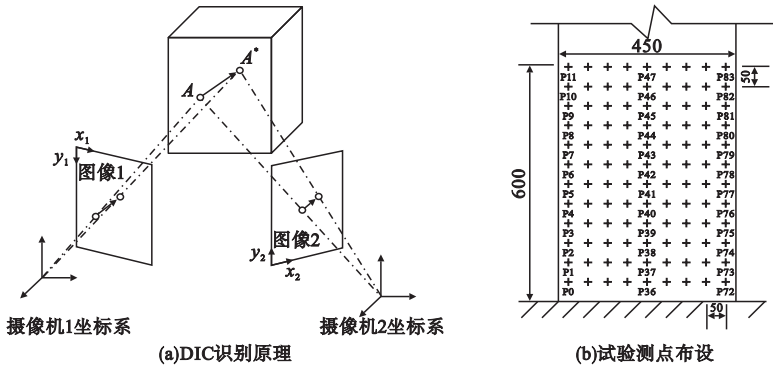


图 2 DIC 原理及测点布设

Fig. 2 Principle of DIC and layout of measuring points

1.3 试验加载制度

试验采用位移控制进行低周往复加载,每级循环 3 次,加载位移角依次为 0.10%、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.50%、2.00%、3.00%,之后每级增加 1.00%,直到试件承载力降为最大承载力 85% 以下。加载历程见图 3。

4)。同时基于 OpenSees 建立桥墩数值模型与试验结果相佐证,模型中混凝土采用 Concrete01 本构模型,接缝混凝土采用 ENT 材料本构模型,不锈钢钢筋及预应力钢绞线采用 Steel02 本构模型,普通钢筋采用 Reinforcing Steel 本构模型。从图 4 可以看出,数值模拟结果与试验结果基本吻合。试件滞回曲线显示无黏结预应力节段拼装桥墩滞回曲线有明显的捏缩现象。试件在加载初期(位移角小于 1%)处于准弹性状态,没有明显的耗能和残余位移;随加载位移增大,钢筋屈服,达到试件最大承载力,试件的耗能增大,残余位移逐级增大;在位移角达到 3% ~ 4% 左右,随着墩身混凝土剥落,承载力逐渐下降,预应力筋提供的自复位能力减弱。从配置的不同耗能钢筋来看,不锈钢耗能钢筋的提升了试件的最大承载力,但增大了残余位移。各试件承载力至最大承载力 85% 时,试件变形均能达到 5% 位移角。

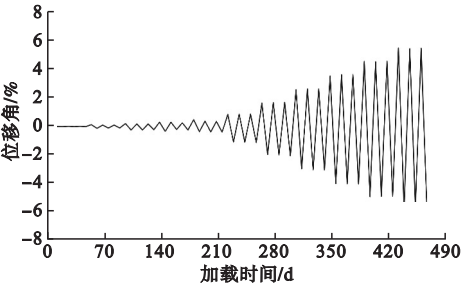


图 3 试验加载历程

Fig. 3 Loading displacements of specimens

2 试验结果

根据加载位移和加载端传感器记录的数据绘制各试件的力 - 位移关系曲线(见图

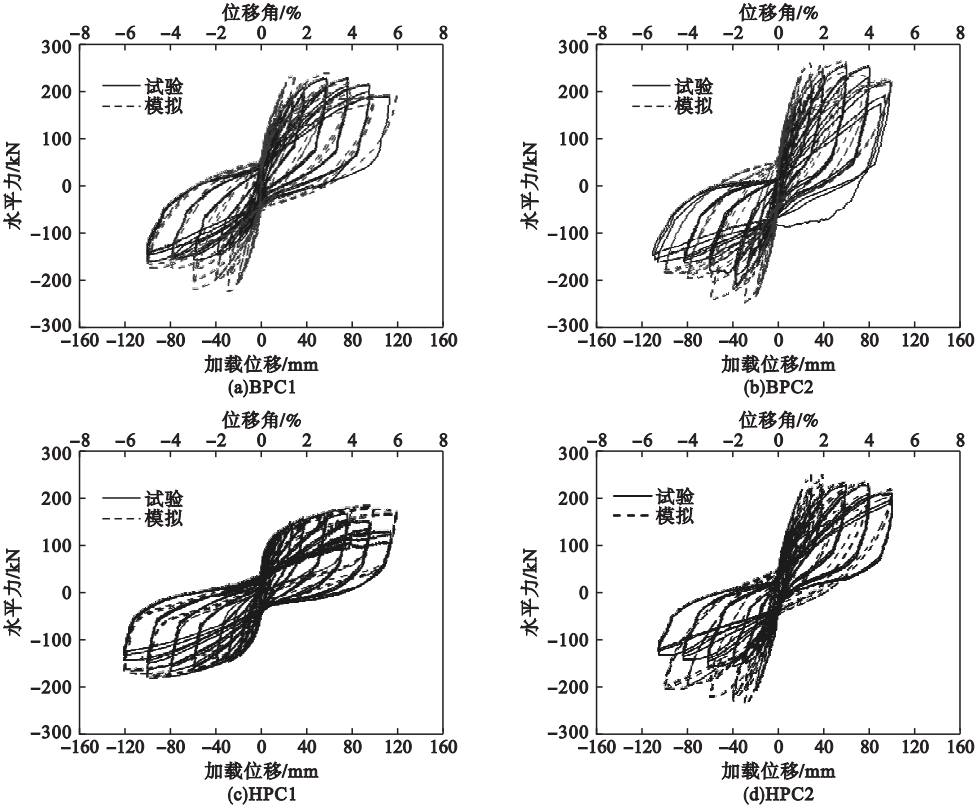


图 4 试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves of specimens

3 桥墩变形结果及分析

3.1 变形成分及计算原理

现浇桥墩变形成分主要以弯曲、剪切和滑移变形为主,而对于节段拼装桥墩,其接缝处张开将是主要变形成分。使用 DIC 测量

了试件第一节段和部分第二节段在每级加载幅值处的空间变位及应变情况,图 5 给出了试件 BPC1 在位移角 5% 时,墩身两侧竖向应变的分布作为参考。笔者测得 4 根试件在加载过程中的位移及应变数据,根据数据结果对节段拼装桥墩主要变形成分进行计算。

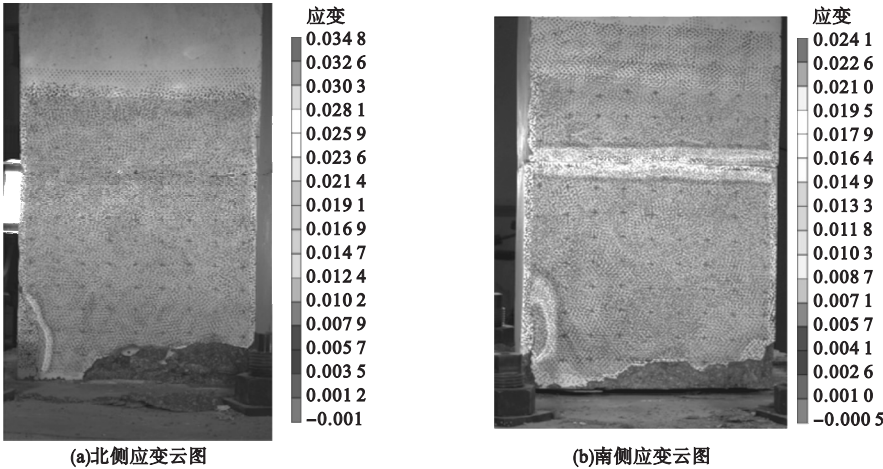


图 5 DIC 实测应变图(BPC1)

Fig. 5 Measured strains of DIC(BPC1)

3.1.1 接缝转动变形

接缝转动变形是指接缝张开后因截面转动引起的墩顶位移,DIC 数据测得接缝数据主要以接缝竖向位移(张开高度)和压缩位移为主,接缝处截面变形计算过程见式(1)~式(3),原理如图6所示。

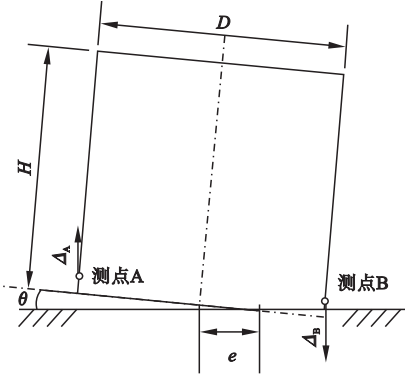


图6 接缝转动引起墩顶位移计算原理

Fig. 6 Calculation principle of pier top displacement by joint rotation

$$\tan \theta = \frac{|\Delta_A - \Delta_B|}{D} \quad (1)$$

$$\Delta_j = \tan \theta \times H \quad (2)$$

$$e = \left| \frac{|\Delta_A|}{\tan \theta} - \frac{D}{2} \right| \quad (3)$$

式中: Δ_A 和 Δ_B 分别为测点A和测点B的竖向位移; D 和 H 分别为截面宽度和接缝截面至墩顶高度; θ 和 Δ_j 分别为截面转角(接缝转动)及其引起的墩顶位移; e 为受压偏心距。

3.1.2 节段弯曲变形

试件的弯曲变形计算主要利用垂直试件加载方向的平面边缘及平面中轴三列标识点间的竖向切应变数据,然后计算曲率变化平均值,计算过程中要将底接缝及第二接缝处应变数据不连续的影响除去。曲率和桥墩弯曲变形计算见式(4)、式(5),计算原理如图7所示。

$$\varphi = \frac{e_{yy1} - e_{yy2}}{D} \quad (4)$$

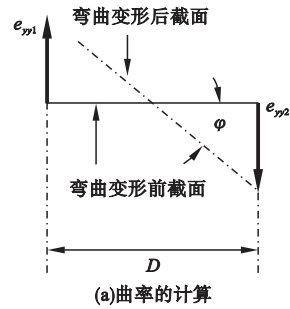
式中: e_{yy1} 和 e_{yy2} 分别为桥墩试件受压侧和受拉侧平面标识点处的竖向应变; φ 为墩身节

段的曲率。

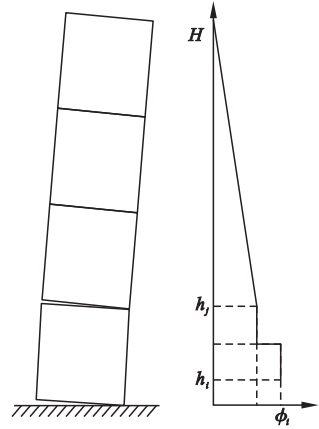
获得曲率沿桥墩高度的分布后,就可利用虚位移原理计算桥墩因弯曲引起的墩顶位移:

$$\Delta_{\text{Bend}} = \sum_{i=1}^{i=j-1} \frac{[\varphi_i (h_{i+1}^2 - h_i^2)]}{2} + \frac{\varphi_{j-1} (H^2 - h_j^2)}{3} \quad (5)$$

式中: φ_i 为 h_i 到 h_{i+1} 区间内墩身曲率; h_i 和 H 分别为区间划分点至墩底高度和墩身高度; Δ_{Bend} 为弯曲变形计算值。



(a)曲率的计算



(b)桥墩弯曲变形计算

图7 曲率和桥墩弯曲变形计算原理

Fig. 7 Calculation principle of curvature and pier bending deformation

3.1.3 节段剪切变形

剪切变形需要以区域内对角线长度变化所确定,DIC 数据虽然能够准确地反应区域内各点位移状态,但在计算剪切变形时需要将其所含的水平和垂直拉伸(微膨胀)所产生的变形量所消除,剪切变形计算见式(6),计算原理如图8所示。

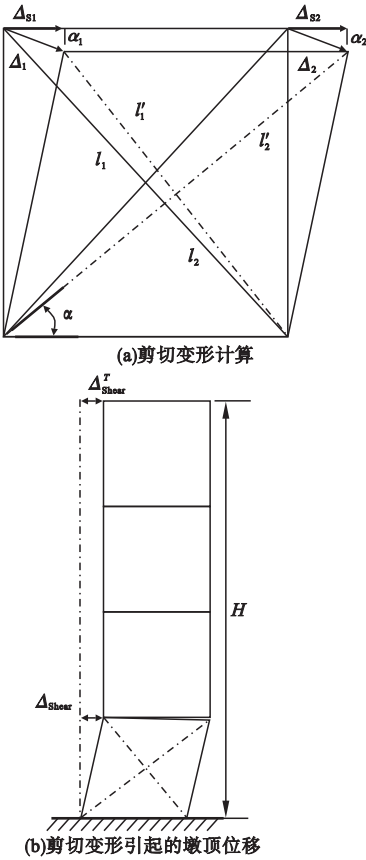


图8 剪切变形及剪切引起墩顶位移计算

Fig. 8 Calculation principle of shear deformation and pier top displacement by shear

$$\Delta_{\text{Shear}} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \frac{[(l'_1 - l_1) - (l'_2 - l_2)]}{2\cos\alpha}. \quad (6)$$

式中: l_1 和 l_2 分别为未发生剪切变形前对角线长度; l'_1 和 l'_2 分别为发生剪切变形后两对角线长度; α 为发生变形后伸长对角线和底边夹角; Δ_1 与 Δ_2 分别为墩身两侧剪切变形; Δ_{Shear} 为计算区域的剪切变形。

剪切变形对桥墩墩顶位移的影响如图 8 (b) 所示, 由于 α_1 与 α_2 角度近乎为 0 得:

$$\Delta_{\text{Shear}}^T = \frac{\Delta_{s1} + \Delta_{s2}}{2} = \frac{\Delta_1 \cos\alpha_1 + \Delta_2 \cos\alpha_2}{2} \approx \Delta_{\text{Shear}}. \quad (7)$$

式中: Δ_{s1} 与 Δ_{s2} 分别为墩身两侧剪切变形引起的墩顶位移; α_1 和 α_2 为剪切变形与剪切变形引起墩顶位移的夹角; Δ_{Shear} 与 Δ_{Shear}^T 分别为计算区域的剪切变形与剪切变形引起的墩

顶位移。

3.1.4 接缝滑移变形

接缝的滑移变形计算原理如图 9 所示。以底接缝为例, 通过与底接缝最近的桥墩上的标示点, 在加载方向上的位移的平均, 减去基础的移位 (采用位移计) 计算得到。接缝滑移位移也等于其引起的墩顶位移。

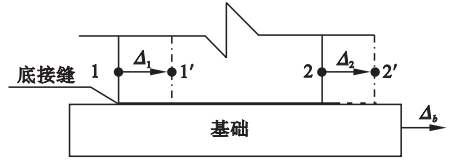


图9 滑移变形计算原理

Fig. 9 Calculation principle of slip deformation

滑移变形计算见式 (8):

$$\Delta_{\text{Slip}} = \frac{(\Delta_1 + \Delta_2)}{2} - \Delta_b. \quad (8)$$

式中: Δ_1 和 Δ_2 分别为点 1 和点 2 的滑移 (沿着加载方向的位移); Δ_b 和 Δ_{Slip} 分别为基础位移计测得滑移和修正后接缝滑移变形。

上述计算都是针对底接缝描述的, 当涉及的第二接缝处变形计算时, 只需去除接缝下桥墩上对应最近的标示点对应的 (刚体) 位移即可。

3.2 预制拼装桥墩变形成分分析

依据上述算法, 图 10 给出了各试件在加载位移水平下的接缝转动变形、桥墩节段变形 (弯曲变形和剪切变形) 及底接缝引起的滑移变形在总位移中的贡献率。从图中可以看出, 配置不锈钢耗能钢筋试件和配置普通耗能钢筋试件在桥墩整体变形成分上没有明显差别, 各变形分量占比基本一致。各试件底接缝转动变形从小位移下占比 40% 左右, 至大位移下 (位移角 5%) 平均占比约 85%; 第二接缝转动变形则会随着底接缝贡献率提升略有减小; 试件的弯曲变形对于总位移贡献随位移角增大而减小, 平均占比范围为 5% 至 15%; 底接缝滑移变形占比在加载前期可到 10%, 加载后期平均占比约 5%; 剪切变形则仅在试件开始加载时有 3% 左右的位

移贡献,随位移角增大其位移贡献率不足1%。以上分析说明了节段拼装桥墩的接缝转动变形占据总位移的主要部分。节段拼装

桥墩的剪切变形影响很小,这可能与试件剪跨比有关。

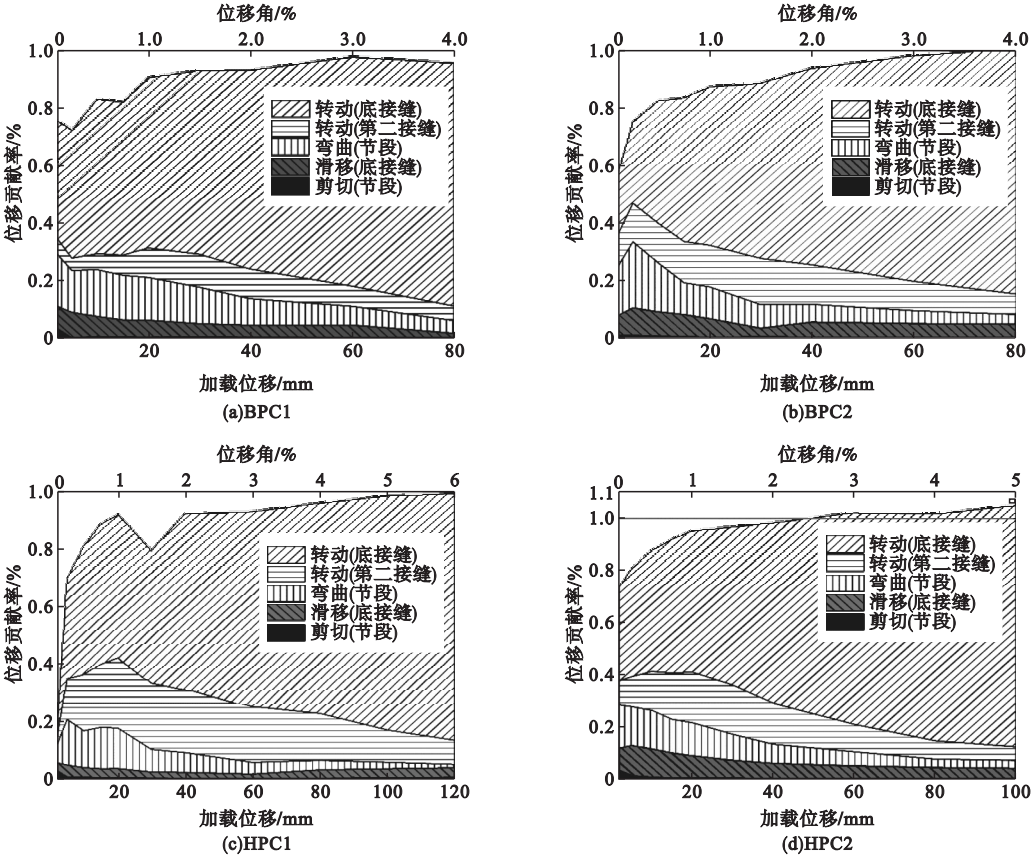


图 10 桥墩整体变形

Fig. 10 The integral deformation of piers

由图 10 可以看出,桥墩整体位移和各个分项位移的计算存在少许误差,在墩顶位移角大于 2% 后,各变形分量对于总位移的贡献率之和接近 100% (个别桥墩略大于 100%,如试件 HPC2),说明 DIC 数据采集和变形成分计算方法是可信的。在墩顶位移较小的时候(如小于 15 mm 或 0.75% 极限位移角时),平均误差在 15% 左右,原因可能是计算时更关注 DIC 标识区变形的影响,此时上部桥墩(节段)的弹性变形也有很大的占比,而后随着墩顶位移增长,误差最后稳定在 5% ~ 10%,甚至于更小,说明上述变形成分分析在大的变形下,可靠性更高。

4 结 论

- (1)底接缝转动是构成节段拼装桥墩墩顶变形的最主要成分,底接缝转动变形从最初的占比约 40%,在位移角到达 5% 后,位移贡献率平均可达 85%;而第二接缝转动变形在试验后期位移贡献率约占 5% ~ 10%。
- (2)节段拼装桥墩的节段弯曲变形随墩顶位移增大对总位移贡献占比减小,从最初的 15% 变为最后的 5% 左右。
- (3)节段拼装桥墩(剪跨比 $\lambda = 4.4$)剪切变形对于墩顶位移的贡献基本可以忽略不计,仅在开始加载时会有 3% 左右贡献,在位移角达到 2% 后位移贡献率均不到 1%。

(4) 节段拼装桥墩的底接缝滑移变形仅在加载初期会有近 10% 的位移贡献,位移角到 1% 后位移贡献率平均在 5% 左右。

参考文献

- [1] JIN R, GAO S, CHESHMEHZANGI A, et al. A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018 [J]. Journal of cleaner production, 2018, 202: 1202–1219.
- [2] ZHANG Q, ALAM M S. State-of-the-art review of seismic resistant precast bridge columns [J]. Journal of bridge engineering, 2020, 25(10): 1–16.
- [3] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用 [J]. 工程力学, 2019, 36(3): 1–23.
(WANG Jingquan, WANG Zhen, GAO Yufeng, et al. Research progress on seismic performance of precast pier system: new materials, new concepts and new applications [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(3): 1–23.)
- [4] 王志强, 葛继平, 魏红一, 等. 节段拼装桥墩抗震性能研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 147–154.
(WANG Zhiqiang, GE Jiping, WEI Hongyi, et al. Recent development in seismic research of segmental bridge columns [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 29(4): 147–154.)
- [5] 包龙生, 王娟, 于玲. 后张无粘结预应力装配式桥墩抗震性能分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2014, 30(3): 429–435.
(BAO Longsheng, WANG Juan, YU Ling, et al. Seismic performance analysis of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge piers [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(3): 429–435.)
- [6] 包龙生, 王娟, 于玲, 等. 在循环荷载下的节段拼装桥墩实体模型试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2013, 29(6): 1030–1034.
(BAO Longsheng, WANG Juan, YU Ling, et al. The physical model tests on precast segmental bridge columns under cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(6): 1030–1034.)
- [7] CALDERONE A, LEHMAN D E, MOEHLE J P. Behavior of reinforced concrete bridge columns having varying aspect ratios and varying lengths of confinement [R]. Pacific earthquake engineering research center, Berkeley: University of California, 2001.
- [8] LEHMAN D E, MOEHLE J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns [R]. Pacific earthquake engineering research center, Berkeley: University of California, 2000.
- [9] 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究及数值分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
(LI Guiqian. Experimental study and numerical analysis on seismic performance of reinforced concrete bridge columns [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.)
- [10] 司炳君, 陈灿, 孙治国, 等. 无黏结预应力 RC 桥墩抗震性能的数值分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 68–76.
(SI Bingjun, CHEN Can, SUN Zhiguo, et al. Numerical analysis of the seismic performance of unbonded prestressed RC bridge piers [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2014, 34(3): 68–76.)
- [11] 王志强, 卫张震, 魏红一, 等. 预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 74–80.
(WANG Zhiqiang, WEI Zhangzhen, WEI Hongyi, et al. Influences of precast segmental connector forms on seismic performance of bridge pier [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(5): 74–80.)
- [12] 葛继平, 夏樟华, 江恒. 灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 221–230.
(GE Jiping, XIA Zhanghua, JIANG Heng, et al. Quasi-static experiment of precast segmental bridge piers with grouted corrugated pipe connection [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(12): 221–230.)
- [13] 高婧, 葛继平, 林铁良. 干接缝节段拼装桥墩拟静力试验研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 211–216.
(GAO Jing, GE Jiping, LIN Tieliang. Pseudo static test for precast segmental bridge columns with dry joints [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(4): 211–216.)
- [14] BU Z Y, OU Y C, SONG J W, et al. Cyclic loading test of unbonded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(2): 1–17.
- [15] PETERS W H. Digital image techniques in experimental stress analysis [J]. Optical engineering, 1982, 21(3): 427–431.
- [16] FAYYAD T M, LEES J M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture [J]. Procedia materials science, 2014, 3: 1585–1590.
- [17] 苏昊, 杨俊, 周建庭, 等. 基于 DIC 的 UHPC 加固锈蚀钢筋混凝土柱轴心受压性能研究 [J]. 材料导报, 2021, 35(增刊 2): 194–199.
(SU Hao, YANG Jun, ZHOU Jianting, et al. Research on axial compression performance of corroded RC columns strengthened with UHPC based on DIC [J]. Materials reports, 2021, 35(S2): 194–199.)
- [18] 熊二刚, 巩忠文, 罗佳明, 等. 基于 DIC 技术的 RC 梁裂缝试验 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021: 1–11.
(XIONG Ergang, GONG Zhongwen, LUO Jiaming, et al. Experiment on cracks in RC beams based on DIC technology [J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2021: 1–11.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)