

# 地铁运营诱发振动实测及传播规律

闫维明<sup>1</sup>, 张 祎<sup>1</sup>, 任 珉<sup>2</sup>, 冯军和<sup>1</sup>, 聂 晗<sup>1</sup>, 陈建秋<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100022;

2. 广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405)

**摘 要:**对某地铁3处典型路段的地铁运营诱发振动进行了实测,分析了其特点和衰减规律,得到了如下一些结果:地铁运营诱发振动的60~80 Hz分量较大,传到建筑物的振动以20 Hz以内的低频振动为主;垂直分量较水平方向衰减慢,且垂直分量振动幅度显著高于水平分量;不同地质条件对地铁运营诱发振动的传播影响较大;离开隧道轴线一定距离存在一个振动放大区,此距离与地层条件、隧道埋深和振源机制有关。本文实测条件下,这一距离为20~30 m;振动放大区能量主要集中在10 Hz以内,高频振动分量总的趋势是随距离的增大而衰减,但某些高频振动分量在某些地质条件下同样会出现反弹情况。最后根据实测数据提出了预测地铁运营引起环境振动的统计回归公式,可为预测或估计地铁运营诱发的环境振动以及地面建筑的防振减振控制提供参考。

**关键词:** 振动; 传播; 衰减

**中图分类号:** TB 533

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2006)02-0149-06

## 0 引言

近年来,我国地铁运输系统发展迅猛,但同时也产生了一些负面影响,其中,以地铁运行诱发的振动对环境的影响尤为显著。据相关文献报道,地铁系统所引起的振动对周边环境产生的影响是不可忽视的,尤其是对振动较为敏感的建筑和设施,已经到了影响其正常工作的程度。地铁运营诱发的振动与噪声已成为国际公认的七大环境公害之一。

国外关于环境振动的研究,早期主要根据现场振动测量结果,给出经验公式<sup>[1-2]</sup>。20世纪80年代以后,各国学者进一步深入研究了地铁振动影响,其中Rucker<sup>[3]</sup>采用有限元法,讨论了地铁运行时所产生的振动辐射变化。80年代后期及近年来,Meike<sup>[4]</sup>和Voberg<sup>[5]</sup>发展了一种分析技术:实验室试验和现场的定量预测方法,并建立了对应的数学模型,给出了一套理论计算预测振动响应的复变函数数学关系式。日本的古田胜指出了地铁运营引发振动主要应研究的问题,即振源的轨道振动、隧道振动、振动在土中的传播,并提出了针对轨道的构造和通过切断振动传播线路的2种减振措施<sup>[6]</sup>。此外,西班牙、捷克等国在这些方面也做了大量的测试、调查和研究工作,通过对几种不同场地土的测试结果统计,分析了列车引起的地面振动波的传播和衰减特性,并从降低行车速度、减轻荷载质量、提高路面平整度等方面提出了减少振害的措施。总的来说,对地铁沿线环境振动的评价、预测方法基本上仍以现场实测和经验公式为主,缺乏系统的研究和定量的评价方法。

国内关于地铁交通引起的环境振动研究,主要是评价单位针对某具体的地铁工程所作的环境影响评价报告书,其预测评价方法主要为简单定量预测方法,及根据国内外已有的研究成果,用经验公式预测某预测点的Z振级。一般经验公式包括振级与车速、距离、轨道参数、地质情况等一些修正项的关系<sup>[7-9]</sup>。基于目前我国地铁环境振动影响预测,主要服务于地铁工程的可行性研究阶段。随着我国高速列车项目的启动,已经建成或正在建设地铁和轻轨系统的城市越来越多,列车的运行速度也在不断提高,振动对环境的影响已经到了必须重视的地步。但由于目前对沿线环境振动的评价、预测方法仍以现场实测和经验公

收稿日期: 2005-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478042); 广东省科技计划资助项目(2003C33303); 北京市教委科技与研究生教育建设项目(4700001401509).

作者简介: 闫维明(1960-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授.

式为主,缺乏系统的理论和定量的评价方法,因此不能有效地指导设计和施工.随着人们对生活环境要求的提高,对这一问题的研究将对提高我国城市居民的生活质量,对列车的高速化、多辆化所引起的环境振动的减振方法的改进和完善也有重要意义<sup>[10-11]</sup>.

作者通过对某地铁3处典型路段的振动实测,分析了地铁环境振动的振动特性和传播规律,得到了一些有意义的结果和结论,可为地面建筑的防振减振控制及城市交通的规划与设计提供参考.

## 1 地铁运营引起环境振动的实测与分析

### 1.1 测点选择与测试仪器

实测测点选择了某地铁3处典型路段:①某地铁I号测点轨道结构为无缝线路,道床为混凝土整体道床,轨道用弹性轨道扣件减震;②某地铁II、III测点轨道结构为无缝线路,道床为弹性短轨枕整体道床,部分地段采用浮置板道床.在其沿线选择典型振动观测场地及与线路垂直的观测线,当列车通过时,对各观测线上诸观测点的地面振动进行了实测.线路选择及测点布置考虑了以下因素:沿线的场地岩土类别;隧道断面形式及线路平面形状;测点至隧道顶的埋置深度及至隧道中心的水平距离;高速路、高架桥及其他交通的影响.测试时列车通过的车速约为 $65 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .观测仪器为WIJ-200加速度传感器和DASP信号采集仪.

### 1.2 振动实测结果与分析

III号路段测点振动加速度测量的结果参见图1.

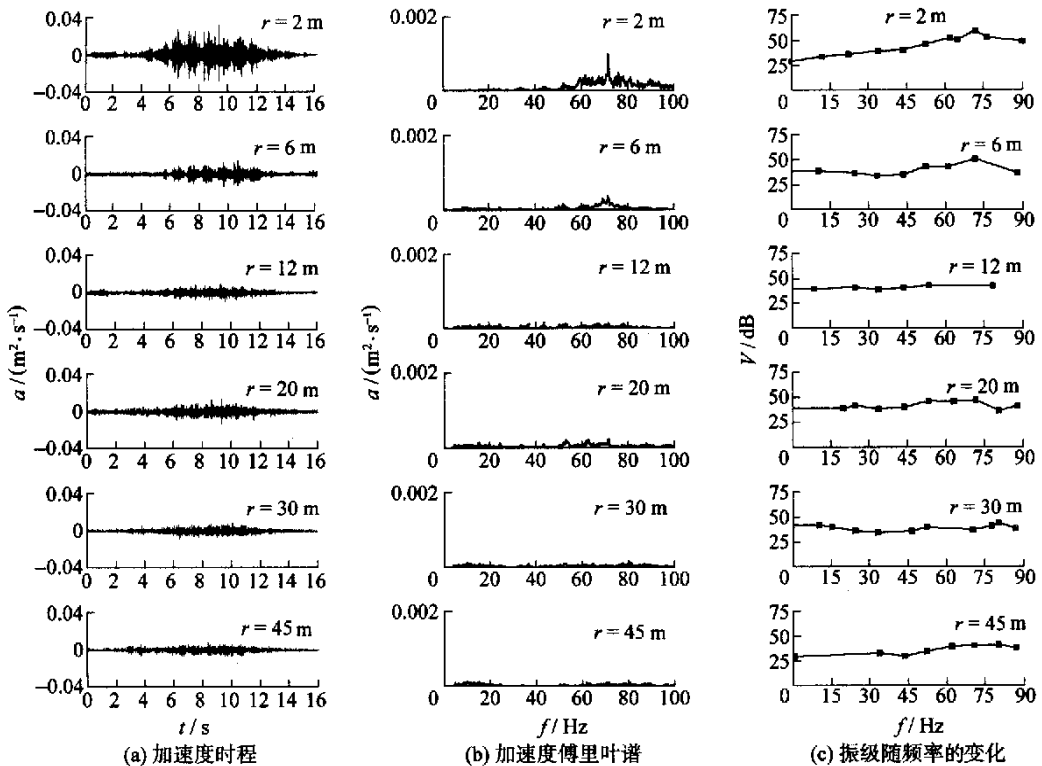


图1 III号测点地面振动实测结果

Fig.1 No.3 measuring point's results of ground vibration

根据我国《城市区域环境振动标准》<sup>[12]</sup>,加速度振级的定义为

$$V = 20 \lg \left[ \frac{a_\omega}{a_0} \right] \tag{1}$$

式中,  $a_\omega$  为频率计权加速度有效值 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $a_0$  为基准加速度值 ( $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

由图 1 可见, 观测线上各测点的振动(加速度)幅度及其傅里叶幅值谱谱值和振级大体上是随着与隧道轴线水平距离的增加而减小. 其中, 60~80 Hz 的振动强度较大, 衰减也比较快, 0~20 Hz 的振动衰减较小(见图 1(b)和图 1(c)), 说明频率愈高振动衰减愈快, 传到建筑物的振动主要为 20 Hz 以内的低频振动. 在  $r = 20 \text{m}$  左右处, 振动强度有所增大, 这证实了地铁振动不是随距离单调衰减而是存在一个放大区的论断<sup>[2]</sup>. I、II 测点振动情况大体与 III 测点相似, 在距离地铁隧道轴线 25 m 附近和 26 m 附近也存在振动放大区, 这说明放大区的位置与地层条件、隧道埋深等有关. 本文讨论条件下, 3 个测点的放大区大约位于距地铁隧道轴线 20~30 m 处, 在这一范围内的建筑物有可能受到地铁列车运营的影响.

图 2 给出了 III 号测点水平和垂直方向加速度有效值随距离的衰减情况 ( $x$  和  $y$  表示 2 个水平方向,  $z$  表示垂直方向), 可见地铁诱发振动的水平分量在传播过程中的衰减要快于垂直分量, 传播到建筑物下的垂直分量大于水平分量. 文献[3] 的实测结果也表明, 建筑物的水平振动一般约比垂直小 10 dB. 因此在评价建筑物受地铁振动的影响时, 应以垂直方向的振动为主. 加速度有效值定义为<sup>[13]</sup>

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{a^2(t)} = \sqrt{\frac{\int_0^T a^2(t) dt}{T}} \tag{2}$$

图 3 描述了距隧道中心线不同距离测点处振级随频率的变化情况. 该图表明, 频率小于 20 Hz 的振动随距离的衰减较小, 其倍距衰减量约为 5 dB; 35~50 Hz 的振动随距离的衰减较大, 其倍距衰减量约为 10 dB; 60~80 Hz 的振动随距离的衰减更大, 其倍距衰减量约为 10~20 dB.

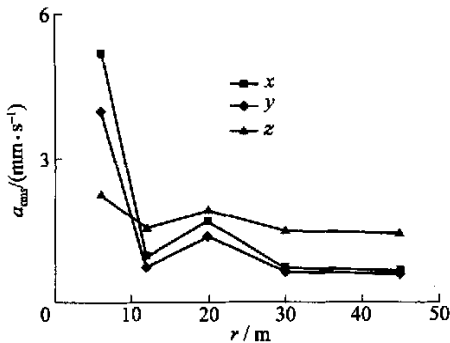


图 2 III 号测点 3 向加速度有效值随距离的衰减  
Fig. 2 No. 3 measuring point's three-direction virtual value of acceleration

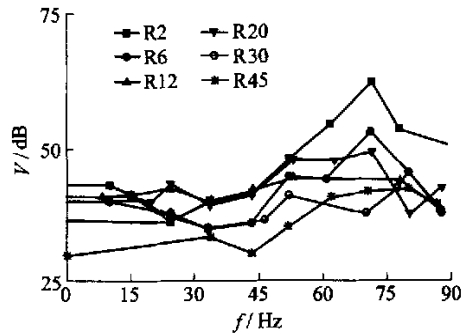


图 3 III 号测点振级随频率的分布  
Fig. 3 No. 3 measuring point's vibration distributing with frequency

图 4 反映了不同频率的振动分量沿地表的传播情况. 其中, A 代表 I 号测点; B 代表 III 号测点(如 B 1 Hz 表示 I 号测点 1 Hz 频率分量). 总的看来, 1、3、5、10、15 Hz 的振动几何衰减较小, 而 30、60、90 Hz 的这些高频振动几何衰减很大. 对于 I 号测点, 从图中可以看出对于 1、3、5 Hz 的低频振动, 尽管幅值的大小不同, 但都在 5、20 m 附近出现了放大区; 而对于 10、15、30 Hz 的振动, 除 10 Hz 在 15 m 附近出现一个放大区以外, 15、30 Hz 的振动随着距离的增大而减小, 没有出现反弹放大的现象; 而 60、90 Hz 的高频振动, 在 8 m 和 25 m 附近也出现了放大区, 其中 60 Hz 的振动在 25 m 附近放大明显, 说明高频振动分量总趋势是随着距离增大振动减小, 但在某些地段也会出现反弹. III 号测点的情况与 I 号测点基本相似, 1、3、5 Hz 的振动都出现了放大区(1、3 Hz 的振动放大区在 8 m 附近, 5 Hz 振动放大区在 20 m 附近); 10 Hz 的振动在 30 m 附近略微有所反弹, 15 Hz 的振动在 20 m 附近也略有放大; 30 Hz 振动则随距离的增大而减小; 60、90 Hz 的几何衰减很大, 基本无放大现象. 从图中还可以看出, I 号测点 10 Hz 以下的振动信号放大明显, 而 III 号测点 10 Hz 以下的振动信号, 虽然也有所放大, 但放大强度要小些; III 号测点 60、90 Hz 的高频振动 10 m 内的衰减很快, 超过 10 m 时, 衰减速率反而变慢了; 而 I 号测点 60、90 Hz 的高频振动却没有这个特

点;Ⅲ号测点 10、15、30 Hz 的振动衰减也快于 I 号测点的同频段信号的衰减。可见,对于不同的振源,不同的土介质,其振动衰减是不同的,其振动衰减速率也是不同的。

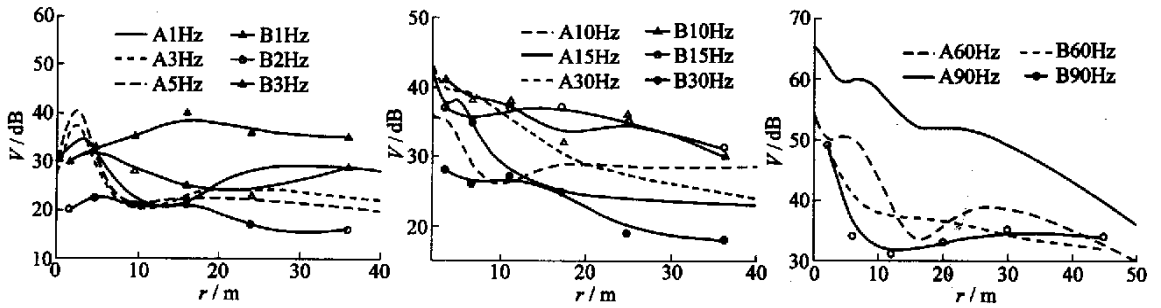


图 4 不同频率分量振级沿地表的分布

Fig. 4 Vibration level distributing with different frequency heft along the earth's surface

### 1.3 振级 V 的统计回归经验公式

地铁隧道振动在地表中的传播受到隧道埋深、土质、地下水、反射物、障碍物以及振动频率、振动方向等多方面因素的影响,故振动波的衰减比空气中声波的衰减要复杂得多,而和声波通过多个反射物传播的情况相似。目前国内尚无成熟的振动衰减模式可借鉴,只能利用类比实测的振动衰减数据拟合曲线来建立预测模型。文献[7]认为列车通过时隧道的振级与如下因素有关:①轨道结构;②道床结构;③隧道衬砌厚度;④轮轨条件;⑤列车运行速度。由于所测试线路弯道比较多,钢轨出现磨痕,导致轨道振动增大,因此隧道振级还应与地铁线路的曲率半径有关<sup>[6-7]</sup>。根据以往的研究结果<sup>[10]</sup>,地铁引起环境振动的 Z 振级可以根据实测数据,运用统计回归的方法按经验公式

$$V_z = V_0 + A \left[ 1 + \left( \frac{w_2 + w_3 - 2}{w_2 - 1} \right) \left( \frac{r - r_c}{w_1} \right) \right] w_2^{-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{w_2 + w_3 - 2}{w_3 - 1} \right) \left( \frac{r - r_c}{w_1} \right) \right] w_3^{-1} + 20 \lg \frac{v}{65} + 0.92 \frac{v}{\rho} \quad (3)$$

进行拟合。式中, r 为观测点到地铁轴线的水平距离; v 为列车行驶速度; ρ 为地铁线路轨道水平曲率半径; V<sub>0</sub>、A、w<sub>1</sub>、w<sub>2</sub>、w<sub>3</sub>、r<sub>c</sub> 与地质条件、道床结构、轮轨条件、隧道结构等因素有关。

由式(3)可得某地铁沿线地面 Z 振级的预测公式为

$$V_z = 65 + 2.1 \left[ 1 + \left( \frac{3 + 4 - 2}{3 - 1} \right) \left( \frac{r - 20}{15} \right) \right]^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3 + 4 - 2}{4 - 1} \right) \left( \frac{r - 20}{15} \right) \right]^4 + 20 \lg \frac{v}{65} + 0.92 \frac{v}{\rho} \quad (4)$$

式中各参数均由最小二乘法拟合求得(如图 5 所示)。

由图可见,实测数据与拟合值符合良好。

## 2 结论

1) 地铁诱发沿线环境振动垂直分量的强度明显高于水平分量,且其沿水平方向传播随距离的衰减也要慢于水平分量,故在评价地铁诱发振动对沿线建筑物的影响时应以垂直分量振动为主;

2) 地铁运营诱发沿线环境振动(竖向)的 60~80 Hz 分量较大,但随着与线路中心线水平距离的增大,高频振动的衰减明显快于低频振动,故传到建筑

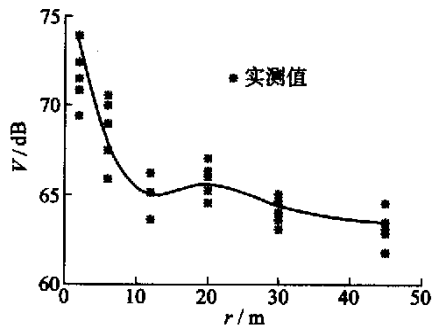


图 5 统计回归公式与实测值

Fig. 5 Statistical recursive formula and measuring results

物的振动以 20 Hz 以内的低频振动为主;

3) 地铁诱发的振动(竖向)在沿地表水平方向传播时,存在一个振动放大区,且主要以 10 Hz 以内振动分量为主. 该放大区距隧道轴线的水平距离与地层条件、隧道埋深和振源机制有关. 本文实测条件下,这一距离为 20~30 m;

4) 不同的地质条件对地铁环境振动(竖向)沿水平方向的传播影响明显.

本文研究的对象虽为某具体的地铁线路,但得到的一些定性结论具有普遍意义,可供预测或估计地铁运营诱发的环境振动以及地面建筑的防振减振控制所参考.

#### 参考文献:

- [1] PESTEREV Alexder V, BERGMAN Lawrence A. Response of elastic continuum carrying linear oscillator[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 8(10): 878-884.
- [2] KURZWEIL L. Ground-borne noise and vibration from underground rail system[J]. *J S & Vib*, 1979, 66(3): 363-370.
- [3] RUCKER W. Numerical solution of multiple scattering problems using the boundary element method[J]. *SEEE*, 1986, 7(11): 377.
- [4] MELKE J. Noise vibration from underground railway lines: proposals for a prediction procedure[J]. *J S & Vib*, 1988, 120(2): 391-406.
- [5] VOBERG K G. Propagation of ground vibrations near railway tracks[J]. *J S & Vib*, 1983, 87(2): 371-376.
- [6] FUJIKAKA T. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains[J]. *J of Sound and Vibration*, 1986, 111(2): 289-297.
- [7] 辜小安, 刘宪章, 张春华. 地铁环境振动预测方法浅析[J]. *环境工程*, 1996, 14(5): 35-39.  
GU Xiao-an, LIU Xian-zhang, ZHANG Chun-hua. The method study on prediction of subway environment vibration[J]. *Environmental Engineering*, 1996, 14(5): 35-39. (in Chinese)
- [8] 庄学真, 温健婷, 陈建秋, 等. 地铁引起城市环境振动 Z 振级的实验研究[J]. *华南建设学院西院学报*, 2000, 8(9): 15-19.  
ZHUANG Xue-zhen, WEN Jian-ting, CHEN Jian-qiu, et al. Research for the degree of Z direction vibration about the city environment affected by subway[J]. *Journal of South China Construction University(West Campus)*, 2000, 8(9): 15-19. (in Chinese)
- [9] 徐忠根, 任珉, 杨泽群, 等. 广州市地铁一号线振动传播对环境影响的测定与分析[J]. *环境技术*, 2002, 4(3): 12-14.  
XU Zhong-gen, REN Min, YANG Ze-qun, et al. Environment vibration measurement and analysis of first line guangzhou subway[J]. *Environmental Technology*, 2002, 4(3): 12-14. (in Chinese)
- [10] 孙洪刚. 移动荷载作用下基于有限元的环境振动分析[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2002.  
SUN Hong-gang. Analysis of environment vibration under moving loads by finite element method[D]. Wuhan: The College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [11] 李晓霖. 地铁诱发振动对地面以及地上结构的影响规律研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2002.  
LI Xiao-lin. Study on influence of vibration induced by subway train on ground and ground structures[D]. Beijing: The College of Civil Engineering and Architecture, Beijing University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [12] 刘维宁, 夏禾, 郭文军. 地铁列车振动的环境影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(10): 586-593.  
LIU Wei-ning, XIA He, GUO Wen-jun. Study on vibration effects of underground trains on surrounding environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(10): 586-593. (in Chinese)
- [13] 夏禾, 吴萱, 于大明. 城市轨道交通系统引起的环境振动问题[J]. *北方交通大学学报*, 1999, 23(4): 1-7.  
XIA He, WU Xuan, YU Da-ming. Environment vibration induced by urban rail transit system[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1999, 23(4): 1-7. (in Chinese)

## In Situ Experiment and Analysis of Environmental Vibration Induced by Urban Subway Transit

YAN Wei-ming<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, REN Min<sup>2</sup>, FENG Jun-he<sup>1</sup>, NIE Han<sup>1</sup>, CHEN Jian-qi<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Research Test Center of Earthquake Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** This article carried out vibration tests on three typical road sections along a subway, and analyzed the regulation of vibration attenuation. The conclusion is that the 60~80 Hz weight of environmental vibration of subway is stronger than other weight, and the weight transmitted to structures is mainly dominated by frequency below 20 Hz; the vibration in vertical weight attenuates more slowly than in horizontal weight, and the amplitude in vertical weight is higher than in horizontal weight; there exists a vibration amplifying zone in a certain distance to subway track, which is determined by the geological condition, the depth of the tunnel and mechanism of vibration. In this paper, the distance is 20~30 m away subway track; the energy were mainly within 10 Hz in the vibration amplifying zone, and high frequency vibration weight could attenuate with the increase of distance, although some could magnify under certain geological conditions. Finally, the attenuation empirical formula was given to predict subway environmental vibration, which could be used for reference in vibration control and buffer design of the ground structure.

**Key words:** vibrations; propagation; attenuation

(上接第 148 页)

## Experimental Study on Seismic Performances of Precast Prestressed Concrete Beam-to-column Connections with Unbonded Tendons

DONG Ting-feng<sup>1,2</sup>, LI Zhen-bao<sup>1</sup>, ZHOU Xi-yuan<sup>1</sup>, FENG Li-feng<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038)

**Abstract:** An experimental study on seismic performances of five beam-column connections subjected to reversed cyclic loading was conducted. These performances included failure pattern, hysteresis characteristics, displacement-restoring capacity, displacement ductility, and energy dissipation. The objective of the study is to develop guidelines for the design of precast prestressed concrete beam-to-column connection with unbonded tendons for regions of high seismicity. The study results show that the performances of precast prestressed beam-to-column concrete connections with unbonded tendons are equal or superior to that of a monolithic connection.

**Key words:** precast; frame; connections; seismic performances; experimental study; unbonded tendon