

钢纤维高性能混凝土在声屏障中的应用

朱万旭^{1,2} 黄家柱^{1,2} 彭翰泽³ 李长乐^{1,2} 金凌志^{1,2}

(1 广西岩土力学与工程重点实验室 2 桂林理工大学土木与建筑工程学院 桂林 541004

3 上海中驰集团有限公司 上海 201105)

摘要:在高速铁路的降噪系统中,混凝土声屏障因其降噪效果好、造价低和施工方便正越来越受欢迎。壳体材料选择和结构设计是制作高强轻质混凝土声屏障单元板的关键。为提高台风区高速铁路声屏障单元板的抗弯强度,壳体材料采用钢纤维高性能混凝土。通过计算、试验并结合施工因素,声屏障单元板壳体最小壁厚取25mm,内空腔取消隔板。有限元分析结果表明,其在最不利工况——背板在7.0kPa弯曲荷载作用下,壳体最大拉应力小于钢纤维高强混凝土材料抗拉强度值9MPa。经试验性能研究:背板在高达8.0kPa弯曲荷载作用下,单元板没有开裂破损,跨中挠度较小;单元板降噪系数达0.75,隔音量40dB,均优于要求标准。研究表明该单元板自重小,强度满足台风地区高速铁路的抗弯性能要求,吸音性能优良。

关键词:吸音性能 声屏障 降噪系数 结构设计 有限元分析

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.01.001

1 前言

高速公路、铁路、城市轨道交通穿过人口集中的居住区、学校、办公区等地方时,所产生的交通噪声给道路附近人群的生活、学习、工作带来了很大的影响,必须在道路两旁设置声屏障减小噪声对他们造成的干扰。混凝土声屏障由于造价低、耐久性高、制作和安装方便等特点,拥有良好的应用前景。我国早在20世纪90年代初就对不同复合材料的混凝土声屏障进行了研究。贾志锋^[2]以炉渣无砂大孔混凝土作声屏障材料,介绍了该材料用于高速公路声屏障工程的建筑设计、材料选用、工程实例和隔声性能及造价比较等。于洪涛^[3]将纤维自密实混凝土应用于声屏障,通过对不同种类纤维自密实混凝土的试验和对比,研制了一种具有良好抗收缩性能和力学性能的声屏障。唐玉斌、朱立和李昊等^[4]结合南京地铁二号线东延线工程的特点,介绍了工程声屏障结构单元板用活性粉末混凝土的制备、搅拌、浇筑和养护等施工工艺,以及活性粉末混凝土单元板在工程中的应用情况。声屏障工作时主要承受弯曲荷载的作用,普通混凝土声屏障抗拉性能差,其材料抗拉强度才4MPa左右,在弯曲荷载作用下容

易产生变形过大和断裂破坏等问题。台风地区的弯曲荷载较大,对声屏障的强度要求更高。

我国自1997年开始研究活性粉末高性能混凝土^[4],其抗拉强度已能达到20~30MPa,抗压强度达100~230MPa,发展至今技术已渐成熟。为了提高单元板抗弯强度和控制自重,将钢纤维高性能混凝土材料应用于声屏障单元板壳体并对混凝土声屏障单元板进行结构设计。

2 声屏障单元板构造设计

根据高铁非金属声屏障通用参考图要求进行设计,声屏障单元板以吸声憎水型吸音岩棉为主,表面衬以防水的耐碱GRC玻纤网格布,然后外包混凝土壳体而成。为达到降噪系数 ≥ 0.7 ,隔声量 ≥ 30 dB性能指标,吸音岩棉厚度取90mm。

声屏障单元板的具体结构构造如图1。为了增大吸音效果和减少自重,壳体混凝土结构设计为布置有吸音孔的长方体空心结构,外形尺寸3960mm \times 500mm \times 140mm,厚度尽可能减薄,且内空腔不设增强结构刚度的隔板;壳体朝向铁路的面板有吸音孔,孔隙率为30%,孔尺寸为20mm \times 150mm。

壳体是主要承受荷载的结构,为了提高抗弯

能力其面板和背板均布置10φ8的纵向钢筋。为了控制单元板的自重和成本，混凝土壳体厚度不宜过大，但也不宜过小，否则施工成型有难度且质量不易控制。壳体材料和厚度设计是声屏障板的关键。首先，先按照制造工艺水平，初步确定最小厚度设计为25mm，然后，通过计算分析，根据受力选择混凝土材料。

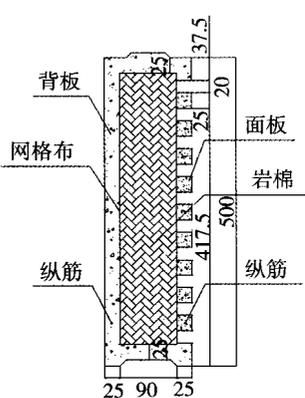
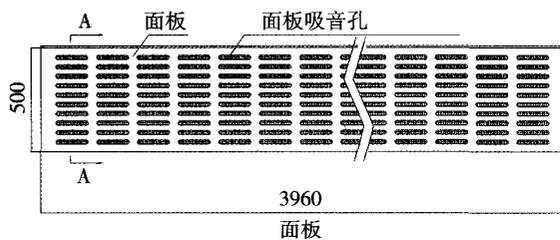


图1 声屏障单元板结构构造

3 单元板受力理论计算

3.1 计算截面最大拉应力

声屏障工作时弯曲荷载分别作用在面板和背板上，当截面受拉区边缘拉应力大于材料的抗拉强度时会产生裂缝。弯曲荷载作用在背板上时为截面最不利工况，只需计算弯曲荷载作用在背板时截面受拉区边缘的应力。单元板在未开裂阶段钢筋发挥的作用小且配筋量较少，在本节计算时为了简便先不计钢筋的作用。根据《时速350km客运专线铁路路基插板式非金属声屏障》（铁路工程建设通用参考图，通环（2009）8326），弯曲荷载取值7.0kPa（即作用在单元板上的极限线荷载 $q=3.5\text{KN/m}$ ）。单元板简化截面如图2。

单元板弯曲计算简图如图3。

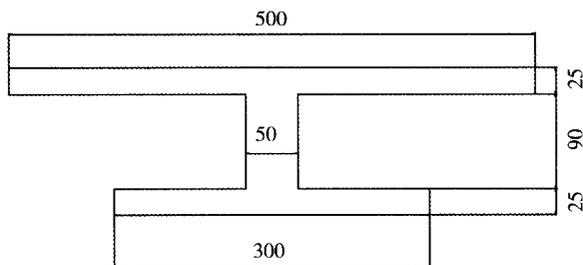


图2 声屏障计算简化截面

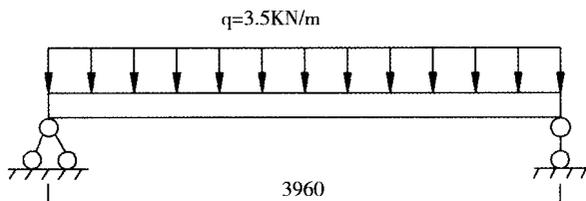


图3 计算简图

单元板未开裂时截面处于弹性状态，截面受拉区边缘应力 σ_t 计算公式：

$$\sigma_t = \frac{M y_0}{I_0} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{8} q l^2 \quad (2)$$

式中 M —单元板跨中最大弯矩；

I_0 —单元板简化截面惯性矩；

y_0 —简化截面受拉区边缘至中和轴距离；

l —单元板长度。

各项计算数值如表1。

表1 计算数值

$I_0 (\text{mm}^4)$	$y_0 (\text{mm})$	$q (\text{kN/m})$	$l (\text{mm})$
66830463	81	3.5	3960

将上表各计算数值代入式（1）和（2），算得 $\sigma_t=8.315\text{N/mm}$ 。

3.2 混凝土材料选择

为了避免声屏障在弯矩荷载下产生裂缝而导致断裂破坏，单元板混凝土的抗拉强度需大于截面受拉区边缘应力 σ_t 。考虑计算误差、安全冗余和经济性，选择钢纤维高性能混凝土抗拉强度值 $>9\text{MPa}$ ，并掺入钢纤维进一步提高延性和韧性，其弹性模量取 $E=5.1 \times 10^4\text{MPa}$ 。

3.3 验算跨中挠度

验算钢纤维高性能混凝土制成的单元板变形是否满足要求，单元板未开裂时跨中最大挠度计算公式：



$$w = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (3)$$

经计算 $w=3.288\text{mm}$ 小于设计限值 $l/200=3960/200=19.8\text{mm}$ 。

4 单元板结构有限元模拟分析

采用非线性有限元分析程序ANSYS,建立三维有限元分析模型,对声屏障单元板的结构受力性能静力模拟分析。由于声屏障单元板上弯曲荷载主要由壳体承担,所以仅模拟壳体的受力性能,吸音材料和网格布的作用可以忽略。施加约束和荷载计算模型如图4。

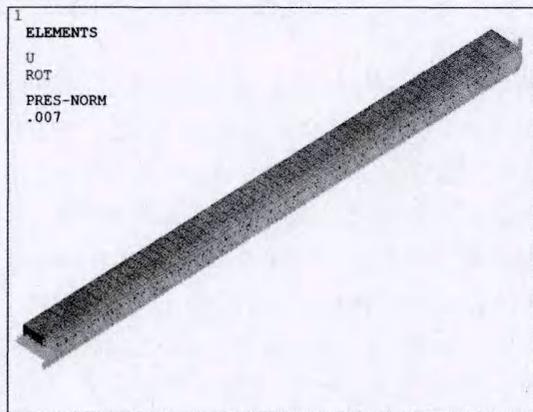


图4 计算模型

单元板两端简支,面荷载 7.0kPa 施加在背板上。混凝土采用SOLID65单元,弹性模量 $E=5.1 \times 10^4\text{MPa}$,泊松比 $\lambda=0.25$,混凝土裂缝张开的剪力传递系数为 0.45 ,裂缝闭合的剪力传递系数为 0.9 ,抗拉强度为 9.0 ,由于不考虑混凝土抗压破坏,取单轴抗压强度为 -1 ;钢筋采用PIPE16单元,弹性模量 $E=2 \times 10^5\text{MPa}$,泊松比 $\lambda=0.3$ 。

计算得到的板混凝土第一主应力如图5。

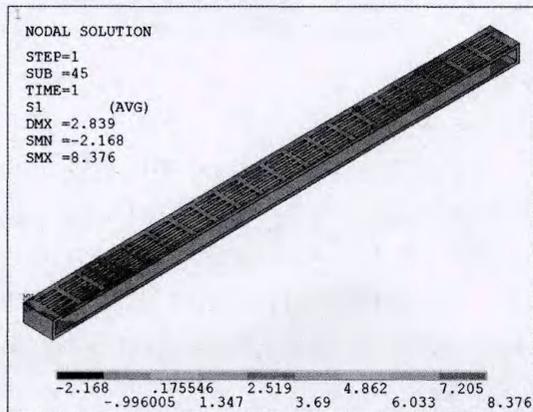


图5 单元板中混凝土的第一主应力(单位:MPa)

单元板中钢筋的第一主应力如图6。

单元板跨中最大挠度如图7。

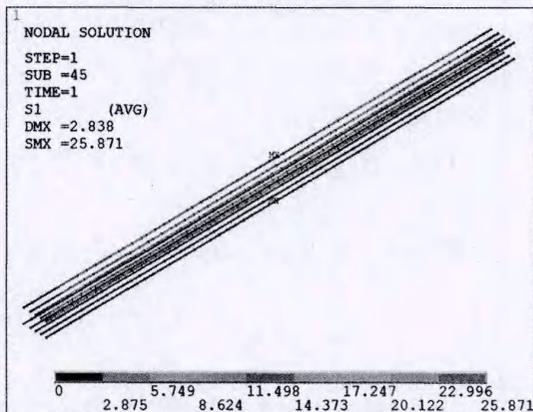


图6 钢筋第一主应力(单位:MPa)

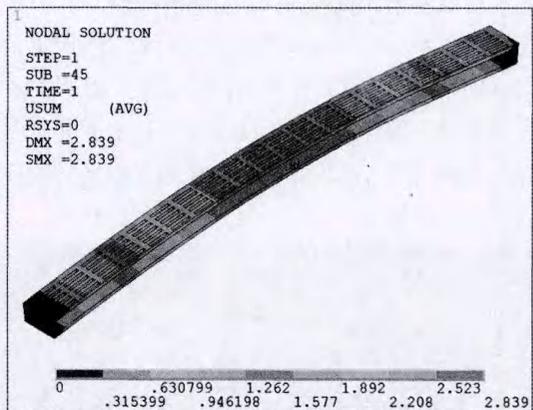


图7 单元板跨中挠度(单位:mm)

由图5得出单元板中混凝土最大应力 8.376MPa ,与理论计算值 8.315MPa 接近,表明面板开孔并没有造成太大的应力集中,依然小于设定的混凝土抗拉强度值 9MPa ,单元板不会开裂。图6钢筋应力最大应力 25.871MPa ,应力值较小,钢筋安全裕度大。表2所示,单元板的跨中挠度最大值 2.839mm ,比理论计算值 3.288 还小,说明钢筋的加入增加了结构刚度。

ANSYS分析结果总结如表2。单元板的结构设计和选用的混凝土类型符合设计要求。

表2 ANSYS分析结果总结

荷载值 (kPa)	混凝土最大拉 应力(MPa)	钢筋最大拉 应力(MPa)	跨中最大 挠度(mm)
7.0	8.376	25.871	2.839

5 声屏障单元板制作

5.1 钢纤维高性能混凝土配制

根据以往配制经验,钢纤维高性能混凝土使



用材料如下，其配合比如表3。

水泥：普通P·II 52.5R硅酸盐水泥。

粗集料：5~10mm碎石，级配连续。壳体厚度较小，不宜采用过大粒径的粗集料。

细集料：中细河砂。

掺合料：粉煤灰、粉煤灰、硅灰。

外加剂：聚羧酸高效减水剂。

钢纤维1：长度30mm，直径0.55mm，端勾型

钢纤维。

钢纤维2：长度13mm，直径0.18mm，平直型钢纤维。

根据钢纤维高性能混凝土配制的经验，所配制的钢纤维高性能混凝土的劈裂抗拉强度将近15MPa，按照换算经验和换算理论，将其折合成不小于9MPa轴心抗拉强度的混凝土具有很大的可靠性。

表3 钢纤维高性能混凝土配合比

水泥	细集料	粗集料	水灰比	硅灰	粉煤灰	矿粉	钢纤维1	钢纤维2	减水剂
1	1.2	2.1	0.25	0.1	0.2	0.3	1.5%	1.5%	1.5%

注：1、钢纤维的掺量为体积率；2、减水剂掺量为相对于胶结材料质量百分比。

5.2 声屏障单元板模具

制作声屏障单元板的模具如图8、图9所示，整体模具由底板和四块钢板组合而成，底板为木板及在其上的PVC塑料板固定而成，上面的“凸起”为预留吸音孔而布置，四块相互嵌插的钢板支立在底板上。

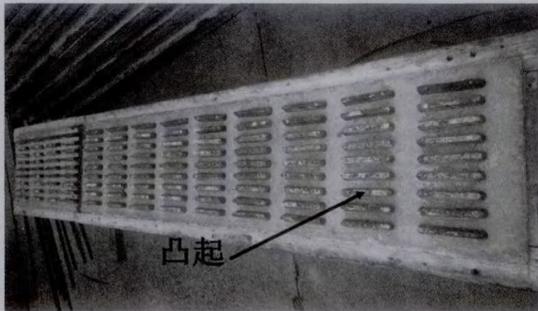


图8 底板



图9 整体模具

5.3 制作工艺

制作过程如下：（1）将声屏障单元板的整体模具组装固定好，并且在模具内涂抹脱模油；（2）将搅拌好的混凝土均匀铺在底板上，大概

到“凸起”一半高度时放置钢筋，再将混凝土铺在钢筋上，振捣抹平，高度与“凸起”齐平；（3）在混凝土上铺一层网格布，在网格布上放置吸音岩棉，预留两侧侧板和两端端板位置，再在吸音岩棉上铺一层网格布；（4）在网格布上、岩棉预留的位置内铺放混凝土，放置钢筋，再铺一层混凝土，振捣抹平，整个板的高度与模具齐高；（5）24小时后拆模，养护28天，在标准养护条件下养护。制作的声屏障单元板试件如图10。

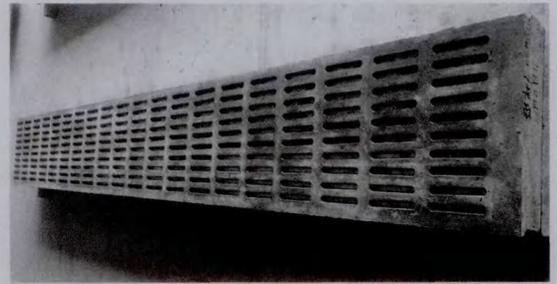


图10 声屏障单元板试件

6 单元板性能试验

6.1 吸音性能测试

在国家建筑材料测试中心按TB/T3122-2010《铁路声屏障声学构件技术要求及测试方法》进行了降噪系数和隔声量的测试，其中降噪系数达0.75，大于标准要求值0.7；隔声量为40dB，大于标准要求值30dB，证明了该型声屏障单元板声学性能优良。

（下转第27页）

隔离电阻值, 满足BS EN1537: 2000大于 $0.1M\Omega$ 的要求。

表2 锚索隔离电阻值测量数据

锚索编号	测量值 ($M\Omega$)		备注
	张拉前	张拉后	
1-1	0.028	0.016	普通光面钢绞线+全长波纹管
2-1	2000	301.1	OVM双层电隔离防护锚索 (环氧喷涂钢绞线+全长波纹管)
3-1	0.001	0	环氧喷涂钢绞线+部份波纹管

5 结束语

新防腐技术和方法是提高并维持预应力锚索耐久性的重要手段, 本文通过介绍预应力锚索电隔离防护技术及其日常测试方法, 进一步研究了双层电隔离防护锚索的结构组成和主要性能, 并进行了长期防护性能测试。试验结果表明, OVM双层电隔离防护锚索采用环氧喷涂钢绞线和锚索波纹管组合较好地解决了锚固可靠性以及在潮湿等恶劣工况下有效实施电隔离防护的技术难题, 其永久防护隔离电阻值满足欧洲标准要求, 是一

(上接第6页)

6.2 抗弯性能试验

测试方法为四点弯曲加载法, 将荷载加载到背板上。在板的跨中布置应变片, 观察板面上是否有裂缝产生并记录跨中挠度值。若板面上无裂缝出现则满足抗裂要求, 且跨中挠度要小于设计限值19.8mm。

对3块单元板试件进行试验检测, 在面荷载7.0kPa时, 板面上无肉眼可见裂缝产生, 跨中挠度为3~4mm, 远小于其限值。当加载到8.0kPa时单元板仍未发生断裂破坏, 跨中挠度小于10mm。试验表明弯曲荷载7.0kPa作用下单元板满足抗裂要求和变形要求, 抗弯曲断裂强度达到8.0kPa。

7 结论

试验表明, 该型单元板吸音性能优良。而且, 通过采用钢纤维高性能混凝土作为壳体材料, 壳体厚度可取最小工艺厚度25mm, 内部完全中空不含支撑隔板, 有效地控制了自重。试验研究表明, 弯矩荷载7.0kPa作用下单元板未产生裂缝, 跨中变形小, 抗弯曲断裂强度达到8.0kPa, 满足台风地区高速铁路弯曲荷载的抗弯要求。

种高耐久性的预应力锚索锚固体体系。

近年来, OVM双层电隔离防护锚索在国外, 如苏丹、巴基斯坦、越南、马来西亚、塔吉克斯坦等国得到大量应用, 最大锚索张拉力可达8000kN以上, 该锚索体系为解决岩土预应力锚索的耐久性问题提供了一种新的技术途径。

参考文献

- [1] 程良奎, 范景伦等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [2] 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约. 岩土锚固技术的新进展[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [3] 刘宁, 高大水等. 岩土预应力锚固技术应用及研究[M]. 湖北科学技术出版社, 2002
- [4] 戴源显, 陈佩玉, 温廷睿等. 台湾既有地锚之检查与维护探讨[C]. 2013海峡两岸地工技术. 岩土工程交流会论文集
- [5] 刘平伟, 朱万旭, 周红梅等. 一种后张预应力筋腐蚀防护和监测的新方法[C]. 第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会. 2010.12
- [6] BS EN1537: 2000. Execution of special geotechnical work—Ground anchors[S].
- [7] 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [8] 李宛瑾, 阮仲如, 邱德夫, 杨品铮. 地锚新材料新工法之适用性研究[C]. 2013海峡两岸地工技术. 岩土工程交流会论文集
- [9] 台湾地锚设计与施工问题探讨[M]. 中华技术. 2012总第93期

单元板结构构造简单、施工工序少。可将模具分拆运输, 便于在高速铁路附近施工生产, 显著地降低运输成本和损坏几率, 具有很好的推广应用价值。

本文以裂缝为主要控制目标, 通过理论计算和有限元软件模拟分析作为指导参考依据, 成功研制出了符合要求的声屏障单元板, 有效地减少了试验工期和试验成本; 研制方法可靠实用。

参考文献

- [1] 贺丽平. GRC高速铁路声屏障板正截面受弯承载力的理论分析与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [2] 贾志峰. 炉渣无砂大孔混凝土在声屏障工程的应用[J]. 新型建筑材料, 1994, (6):28-30.
- [3] 于洪涛. 混杂纤维自密实混凝土在预制声屏障中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [4] 唐玉斌, 朱立, 李昊. 活性粉末混凝土在地铁声屏障结构单元板中的应用[J]. 混凝土, 2010,(3):139-141.
- [5] 刘子健, 李晨光. 超高性能活性粉末混凝土研究现状与应用前景探讨[J]. 建筑技术开发, 2009,(4):58-63.
- [6] 王冲, Liza O' Moore. 高性能微纤维增韧混凝土的制备及其力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2009, (6).
- [7] 杜修力, 田予东, 窦国钦. 纤维高性能混凝土的制备及力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2011,(2):44-71.
- [8] 韩嵘, 赵顺波, 曲福来. 钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006,(11):63-67.
- [9] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 时速350km客运专线铁路路基插板式非金属声屏障[Z]. 铁道部经济规划研究院, 2009.
- [10] 游海波, 梁勇. 高速铁路混凝土声屏障单元板整体压制成型自动化生产技术[J]. 混凝土与水泥制品, 2012,(4):58-63.