

钢纤维增强超高性能混凝土 桥梁的设计与施工

黄巧玲 译 宋培建 校

(贵州中建建筑科研设计院 贵阳 550006)

摘要:本文介绍了超高性能混凝土小型道路桥梁的设计、工艺及施工。这些桥梁由预制的预应力混凝土梁与现浇普通混凝土面板组成。为了确定配合比设计、材料性能及其耐久性、研究具有混凝土桥面板和没有混凝土桥面板的预应力混凝土梁的受拉伸性能,进行了一些初步检测。通过测试含与不含纤维的预应力高性能混凝土梁实验分析,验证了钢纤维在结构等级中对均匀性和尺寸效应的影响作用。确定材料的结构性质以设计桥梁的终断面。本文还介绍了采用传统原材料和通用的生产技术配制高性能混凝土结构的工业可行性尝试。同时对使用钢纤维时的生产技术进行了评价。

关键词:桥梁建设 桥梁设计 纤维增强材料 混凝土 梁

1 引言

随着混凝土的开裂、钢筋的腐蚀严重问题出现,钢筋混凝土建筑与桥梁经常会发生严重的耐久性问题,为了改善传统建筑材料差的性能,在建筑施工中引入新材料十分重要。按照高性能混凝土的定义之一是指水灰比低于0.4的混凝土,此定义已沿用至今。水泥基材料性能比较好地符合结构设计的要求,它可以满足特殊性能和匀质性的要求,但传统常规的配合比,拌合、浇注和养护等手段不能获得超高性能混凝土。

研究材料的化学性能可以改善材料的特性,尤其是韧性和耐久性(暴露在外部环境时维持原性能的能力)。在混凝土中添加钢纤维可增高强基料的匀质性。

同时,开发新材料需要新的设计规则,该规则用于材料测试,主要如原型结构的设计与施工调整。本文研究的达到特种混凝土配合比发展与最优化的组分含有:波特兰水泥、超细硅粉、丙烯酸超塑化剂、钢纤维。该种混凝土具有以下基本特性:从流变学上来说几乎自密实、坍落度大于200mm、从拌料开始工作度为1小时的凝结时间,约130MPa的立方体轴心平均

抗压强度。为了控制质量,测试了纤维增强混凝土完整的力学性能(抗压、抗拉、抗折),结果表明材料从实验室级到工业级领域有良好的重现性。

本文介绍了在意大利BreSCia路桥建设中使用的超高性能纤维增强混凝土的试验结果和在通行前的最终调查结果。为了说明钢纤维对结构的作用,同时也进行了超高强普通混凝土梁的测试。

项目介绍了在意大利第一次完整设计和应用超高性能混凝土(VHPC)的过程。执行的是最近的国标推荐项。在使用VHPC的特殊施工上,提供充分的试验数据、调整设计规则包括梁生产过程中完整的质量控制计划。

2 配合比设计

获得超高性能混凝土,材料的选择是关键。为了这种特殊的应用,拌合物应具有好的工作性能(保持200mm坍落度约1小时)和高强度(130MPa)。根据氧渗透性和抗冻耐久性测试确定了硅粉含量(胶凝材料10%)。以体积计的1%的纤维含量可改善材料性能和可承受的实际施工成本。

在进行预备试验的基础上,确定了各材料的比例,见表1。为模拟真实生产条件评定不同养护方法进行了其他的测试。

本文译自美国土木工程师学会《桥梁工程杂志》2003年第5期

表1 最佳配合比

组分	Kg/m ³	备注
水泥 (52.5)	770.00	——
硅微粉 (非捣实, 意大利生产)	86.00	胶凝材料的10%
天然砂 (0-3mm)	512.00	总骨料的40%
破碎骨料 (3-6mm)	770.00	卵石
超塑化剂类	39.00	干料为水泥的1.5%
钢纤维	78.00	D=0.15mm, L=13mm, 体积比约1%
总用水量	213.00	包括超塑化剂的水分
水/胶比	0.25	——
比重	2.50	——

3 试验项目和测试仪器

进行不同的试验以表征材料及其结构的特性。这些测试包括有棱柱体和圆柱体抗压性能、混凝土试件抗拉性能（正拉及弯曲性能）、配筋混凝土梁和桥梁的三点抗折试验。测试了100×100×100mm立方试块、直径100mm、高200mm的圆柱体试件的抗压性能。为了研究受拉性能，进行了不同规格的棱柱体试件的正拉试验和三点抗折试验。

抗压试验使用的是符合标准的试验机，正拉与弯曲试验使用改进的100kN万能拉伸试验机。系统提供了电子机械传感器（最低速度为2μm/h），三个频道可供选择反馈信号，便于控制测试。在弯曲试验中，通过放置在跨中的限

幅器测量开裂点位移的反馈信号。在正拉试验中，采用两根和荷载框相平行的可调式测力计棒，与上截面梁传感器底板相连，组成一种加荷框架，此棒在试样上如作连续任何形式的旋转，会引起不良的弯应力，在这方面，允许有1μm贯穿试件临界截面的均匀开裂。测试了不同龄期的试件，养护时间与抗压强度关系见图1所示。

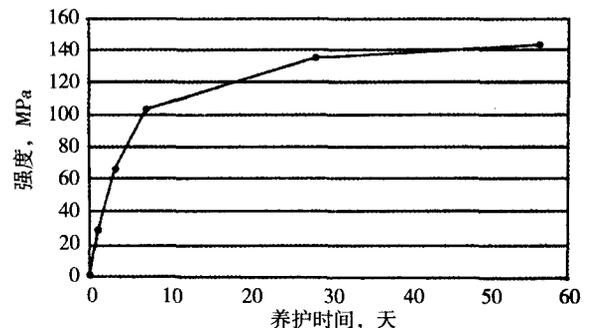


图1 抗压强度与养护时间的关系
(100×100×100mm的立方体)

在弯曲试验中，分别对含有任意分布的钢纤维和不含钢纤维的两组梁进行了测试。试件采用两种不同尺寸（直径范围：1:12）。每种尺寸各成型了3组，浇注后在钢模中振动成型。试件经20℃养护24小时后脱模，然后在20℃的水中养护至少28天。不同尺寸试件的典型加载位移曲线见图2所示。素混凝土梁十分脆（左图）。峰值滞后，随着尺寸的增长，材料逐渐临界软化。图2可以看出，由于加入纤维，明显改善了梁的承载性能。尤其是强度和延展性。

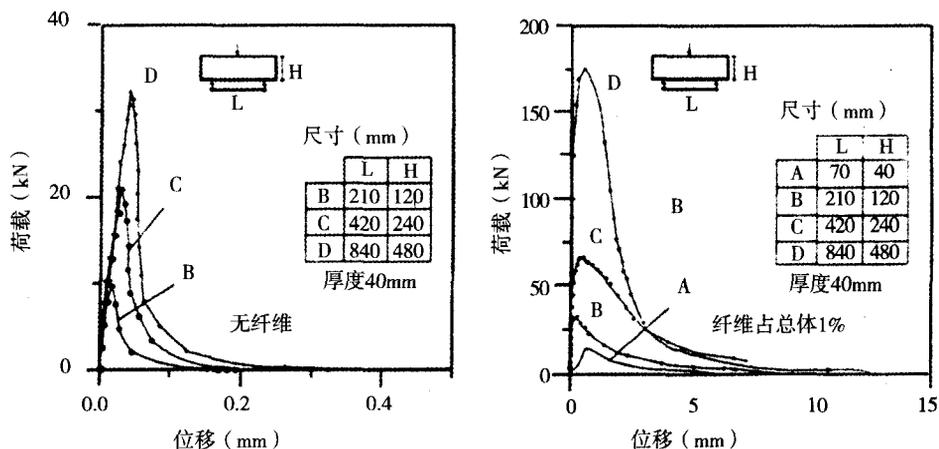


图2 素混凝土梁（左）与纤维增强混凝土（右）的荷载—位移曲线

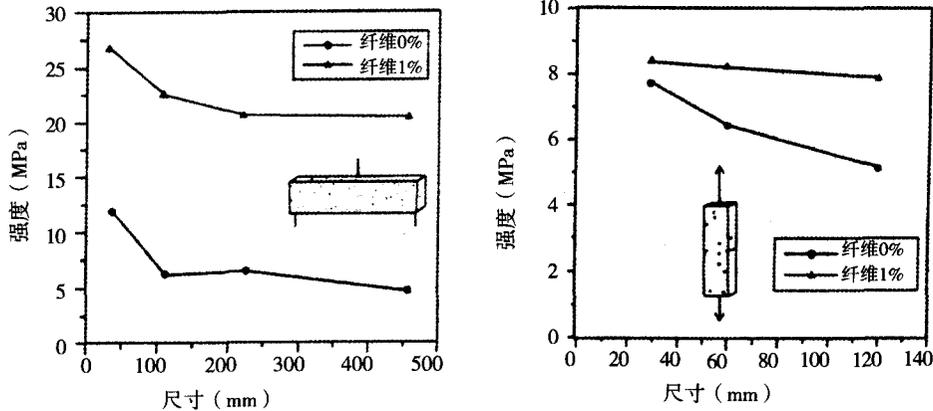


图3 试件尺寸与抗弯强度(左)和抗拉强度(右)的函数关系

在加载峰值基础上计算出每块试件的抗弯强度(断裂模数)见图3(左)。两种材料的数据接近,但纤维增强混凝土的强度降低不明显,举例说,就素混凝土而言,最大梁与最小梁的标准强度相比,素混凝土降低值为59%,而纤维增强混凝土为24%。因此,在脆性基料中加入纤维既控制了裂缝又可降低桥梁的尺寸效应,这也就减少了结构尺寸对公称强度、脆度的影响。

两种材料的受拉试验结果相类似(图3右图):随着尺寸的增大,纤维增强材料最大试件与最小试件在正拉强度上只有少量的减少。

为了得到用于桥梁生产的完整材料特性,进行了下列基本物理试验:氧渗系数为 $7.4 \times 10^{-17} \text{m}^2$,总空隙率为9.25%。与素混凝土相比,纤维混凝土的耐久性试验也很好。

4 桥梁的工业化生产

在产品工业化生产前,第一步制作一根3m长的试验梁,并制定出良好的质量控制计划,以确定所配制的拌合物生产的可能性。

在预制厂拌合准备过程中,尤其应注意添加混合组分的正确顺序:(水泥、硅粉、骨料、超塑化剂,然后加钢纤维等)。

按第一次经验,使用振动纤维离散机避免混合物中的纤维起球是绝对必要的。除了6根试验梁外,还生产了大量的立方体和圆柱体以及小梁,用于力学性能评定。这些试件的试验结果证实超高性能混凝土的生产过程已成功地从试验领域转向工业化生产领域。在这些预备性试验后,

决定对拆模后的工业化生产的梁采用自然养护。然后采用湿麻袋与厚塑料膜覆之,从而确保前7天的高湿润状态,避免由于收缩产生微裂纹。高性能混凝土的工业产品主要物理性能见表2所示。每次加载试验至少测试5个试件。

5 桥梁测试

根据欧洲钢筋混凝土结构标准规范(EC2—1991)中的简支设计要求,对用于桥梁所需的12m长的梁进行测试(图4)。从断面上来看设计属于小型路桥的预应力钢筋混凝土梁。现浇得普通混凝土桥面板试件采用21根7束钢绞线施加预应力(极限强度 $f_{pu}=1860 \text{MPa}$,杨氏模量 $=19500 \text{MPa}$)。图5(c)展示了横断面、钢绞线直径及其分布。

表2 超高性能混凝土的力学性能

力学性能	MPa
28天立方体抗压强度(水中养护)	136
28天立方体抗压强度(工业养护)	126
标准差	4.6~6.7
拉伸强度(28天,水中养护)	19
静态杨氏模量(28天,水中养护)	39,400
动态杨氏模量(28天,水中养护)	45,800

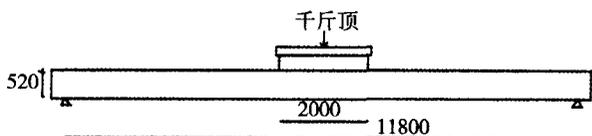


图4 加载设备(以mm计)

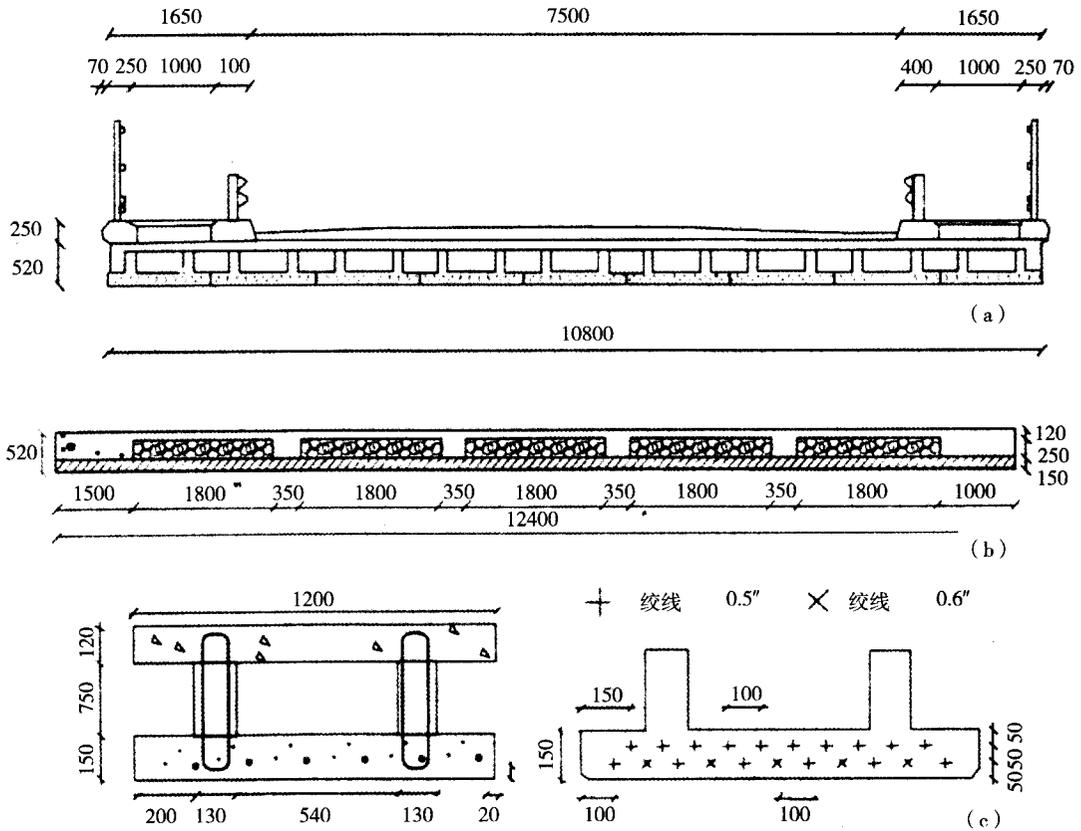


图5 (a)横断面、(b)纵断面、(c)桥剖面、单元断面(以mm计)

共测试了5根梁：两根浇筑桥面板与桥梁端部相类似，一根超高性能混凝土梁但未含钢纤维，另外两根没有桥面板。为了简化加载体系，采用简支试验，利用液压千斤顶进行加载。用测试设备检测桥梁支座的挠度和旋转，跨中放置4台测试仪，其中2台放在顶部，2台放在底部，图6显示了掺有纤维与未掺纤维的梁在不同加载等级下的挠度形状与掺和不掺纤维最大弯矩的函数关系。可以观察到纤维对梁的韧性有显著贡献。图7显示了两根梁在跨中弯矩与位移的曲线，可以看出，两根梁首次出现的开裂十分相似。在开裂点以后，纤维分布对韧性发生了重要作用。当测试体系达到最大承载能力，纤维增强混凝土梁不会导致桥梁的完全破坏。

从跨中弯矩与受压和受拉曲线中平均应变可以看出，在裂缝发生后，由于裂缝数量较少，纤维梁的位移也较小(用传感器测定比值，计量范围50mm)。

通过以下方式操作评价纤维的贡献。在0.003位移下，可以标注纤维增强梁(点A)与普通混凝土

土(点B)的不同弯矩。在正拉测试中，从图8可以看出，纤维增强混凝土的相应应力为3.8MPa，素混凝土则没有数值。A点和B点的差异是由于纤维的填充效果所引起的。这些试验结果表明，纤维梁的强度和韧性均比理论预测值好。在价格占次要地位下，纤维对结构等级具有突出贡献。

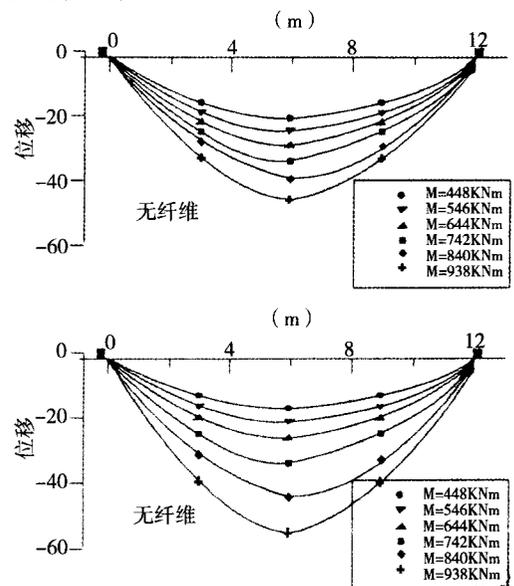


图6 掺纤维及不掺纤维的预应力12m梁的位移

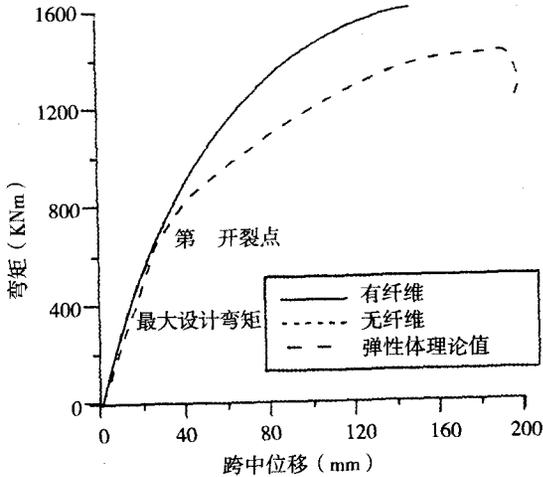


图7 跨中的弯矩与位移曲线

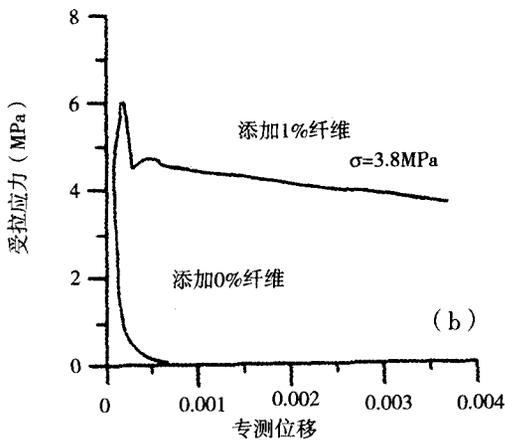
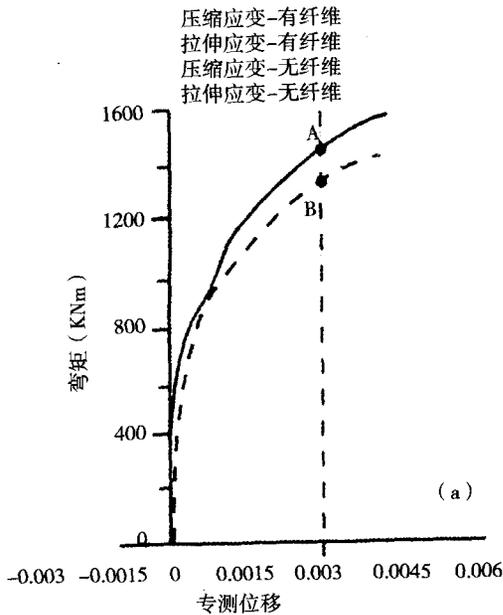


图8 (a) 在中跨受压与受拉的专测位移
(b) 在正拉试验中应力与专测位移曲线

6 桥梁施工、测试以及最后的观测

桥梁单元的测试取得了令人振奋的结果，使得超高性能混凝土在桥梁施工中启动成为可能。使用一台开关闸式起重机，将11根预应力梁放置在以前浇筑的桥梁支座。紧接着放置聚苯乙烯芯型和浇筑桥面板，在2天时间内建成桥梁。

最后，采用两部卡车进行承载能力测试，每台车施加的压力方案如图9所示。在每侧桥梁5个不同位置上放10个不同的静载箱来验证桥面的最大挠度以及对称与非对称性能。这5个位置为：两个支座位置、距支座2.7m处和跨中位置。使用传感器平行放置在桥上的钢梁上，卡车的时速为50公里/小时。这是正常使用状态下的合理速度。没有动态的作用与静态条件下的位移基本一致，最大位移为2mm。

图10示出了静态和动态的测试结果。其结果再与桥梁有限元模型的估计值相比较，在模型中预应力混凝土梁与梁元分离，桥面板与板元分

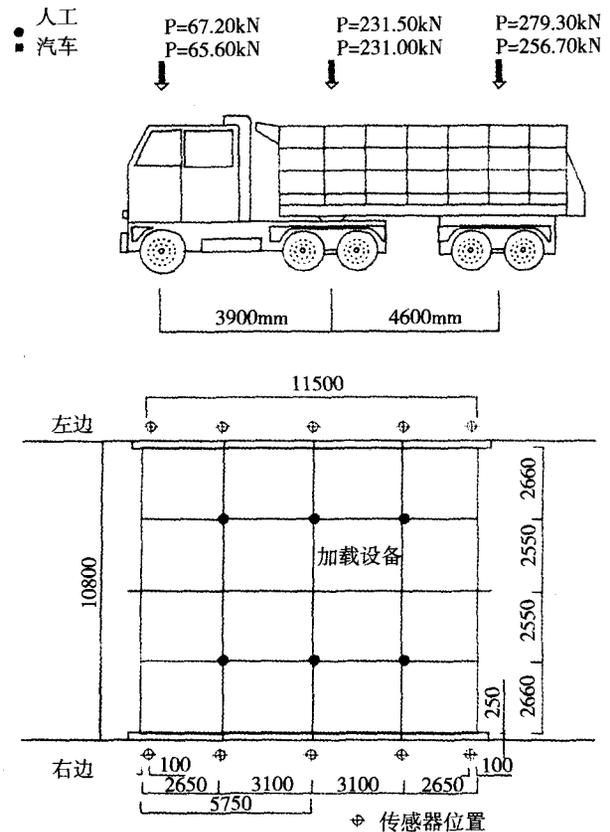


图9 最后观测使用的加载设备 (以mm为单位)

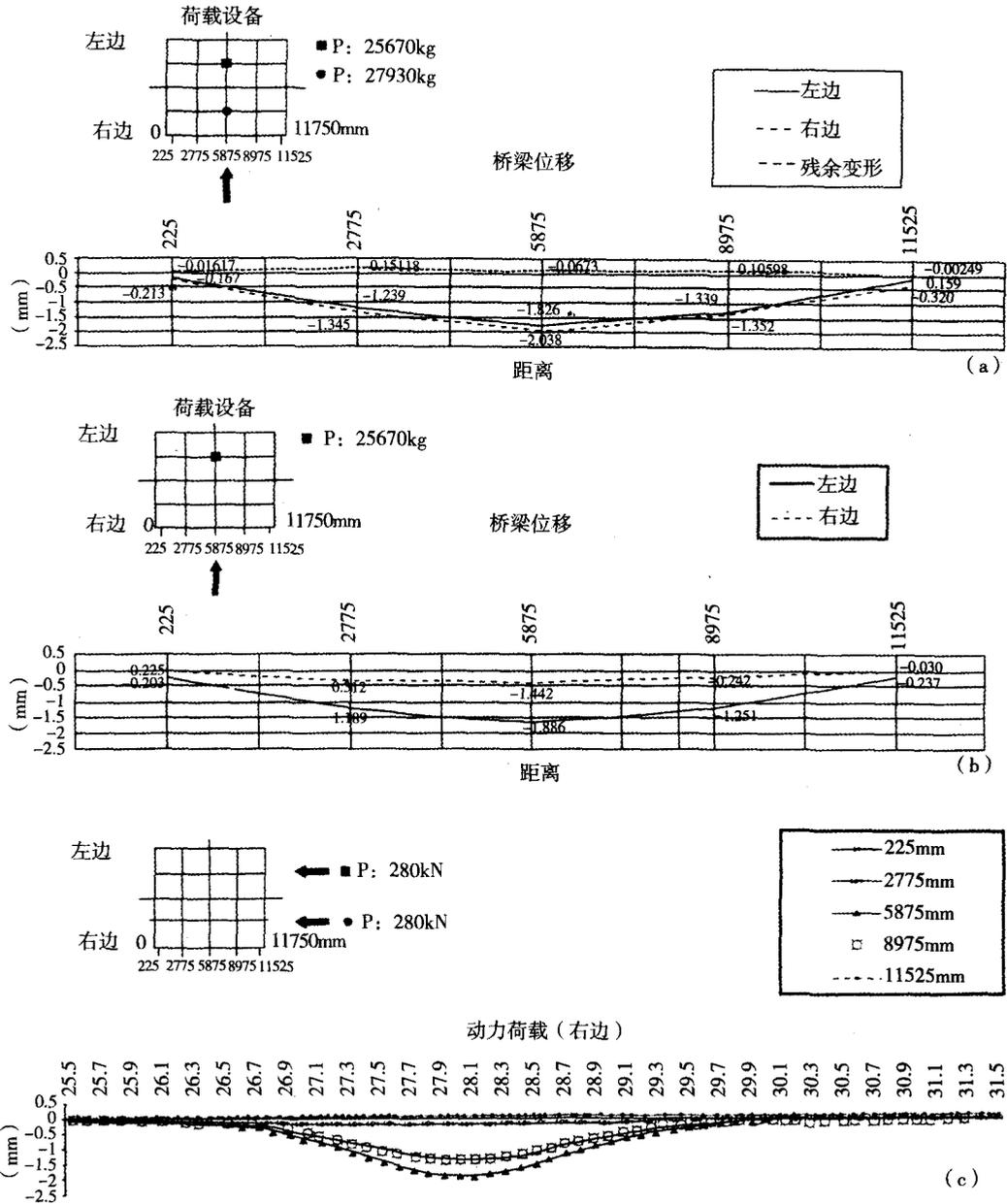


图10 (a) 最大对称荷载下的桥梁位移 (b) 最大对称荷载 (c) 动力荷载

离。假设梁有限元的杨氏模量等于40GPa, 板有限元的模量为38GPa时, 测试结果与预计值间保持良好的一致性。

7 结论

本文介绍了用高性能混凝土进行桥梁施工的足尺测试结果, 生产和测试了一系列的预应力超高性能混凝土梁, 进行了优良的质量控制计划, 桥梁28天抗压强度超过130MPa。

为了取得恶劣环境中的长期耐久性和韧性以

及长期力学性质, 使用纤维增强超高性能混凝土预制产品给基础建设、尤其是桥梁和高架桥建设提供了新的机会。在水泥基混合物中掺入钢纤维能提高梁的抗裂强度、韧性和弹性, 减小尺寸效应。与未掺纤维的梁比较, 工业化生产的掺纤维的超高性能混凝土梁承载力得到显著提高, 在开裂点发生后, 纤维增强混凝土的结构仍比较坚硬, 最大承载能力也有所增长。