

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701004



# 城市立交桥爆破拆除对周围 建筑环境的影响

常方强, 林从谋, 林跃旗, 温智捷, 殷榕鹏, 杨宾

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 利用 Plaxis 软件模拟计算福建漳州市东立交桥爆破拆除对下部地基、国防光缆和周边房屋的影响, 并将波速和变形计算结果与现场测量结果进行对比分析. 研究表明: 桥梁爆破拆除引起的下部地基变形量随着深度的增大而减小, 也随着离桥面水平距离的增大而减小; 有的断面最大波速和地基变形计算结果与测量结果较为接近, 有的相差较大; 爆破拆除引起周边房屋和国防光缆处的地基变形量较小, 最大波速小于安全允许波速, 可以认定爆破拆除对两者的影响在安全允许范围之内.

**关键词:** 桥梁; 爆破拆除; 沉降; 位移; 地基变形

**中图分类号:** TU 435

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2017)01-0019-05

## Influence of Blasting Demolition of City Overpass on Surrounding Environment

CHANG Fangqiang, LIN Congmou, LIN Yueqi,  
WEN Zhijie, YIN Rongpeng, YANG Bin

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The influence of blasting demolition of Zhangzhou east overpass on the lower foundation, optical cable of national defense and surrounding buildings was calculated by Plaxis Software. The measured wave velocities and deformations of foundation were compared with those calculated. It is found that the deformation of the lower foundation caused by the blasting demolition decreases as the foundation depth and the horizontal distance to overpass increases; the difference between the calculated and measured maximum velocities and the deformations of the foundation is small at some sections, however is large at other sections; the foundation deformations of surrounding buildings and optical cable are small, and the maximum velocities are less than the safety allowable velocity. It can be concluded that the influence of the blasting demolition on these two structures is within the scope of safety.

**Keywords:** overpass; blasting demolition; settlement; displacement; foundation deformations

城市立交桥往往位于密集建筑群中, 地下可能埋设有管线. 在爆破拆除后, 桥梁上部结构瞬时坠落到地基上, 对地基产生较大的冲击荷载. 此冲击能量以一定的波速向周围传播, 引起地基振动响应、瞬时沉降和侧向位移. 当波速较大或变形较大时, 对周边建筑物和地下管线产生危害. 桥梁爆破拆除对地基及周边建筑的影响大都采用数值模拟和现场监测两种方法进行计算, 目前, 研究大都集中在利用 LS-

**收稿日期:** 2016-04-27

**通信作者:** 常方强(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事环境岩土工程教学与科研工作的研究. E-mail: changfq@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41306051); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01625)

DYNA 程序模拟桥梁爆破拆除坍塌失稳过程<sup>[1-3]</sup>. 文献[3-5]研究了爆破拆除引起的地面振动响应. 然而,桥梁爆破拆除对地基的瞬时变形和拆除后的堆载变形鲜有涉及,地基的变形会影响到周边建筑的基础和下部管线的安全. 因此,本文以福建漳州市东立交桥爆破拆除为例,利用 Plaxis 有限元动力程序模拟计算该桥拆除对下部地基、国防光缆和周边房屋的影响.

## 1 工程概况

### 1.1 周边环境

漳州市东立交桥位于漳州市区胜利东路与九龙大道交汇处,服役 18 a 后,出现了多项安全隐患,桥梁总体技术状况已恶化为 5 类桥,无法满足现行规范对安全性、通行条件等标准的要求,经多番论证后决定整体拆除.

漳州市东立交桥的周围建筑环境复杂,南侧同辉嘉园小区为 12 层框架结构住宅楼,距离 M 匝道桥约 44~45 m;西侧天福园小区为 7 层住宅楼,距离 F 匝道约 37 m;北侧夏商阳光雅苑小区和东方钻石城小区为 18 层住宅楼,距离 G 匝道桥约 48 m;立交桥范围内有布设了一道国防光缆,其东西向的路径基本与 V 主线平行,并且与其它多条匝道相交,如图 1 所示.

### 1.2 桥梁状况

爆破拆除的立交桥桥墩均为圆柱形,直径有 1.2,1.5 m 两种. 桥面的梁高度为 1.2 m,主桥立交处的梁高为 1.8 m. 桥面宽度有 23.3,13.25,9.5 m 三种. 桥面离地面的高度不等,一般位于 3.0~11.0 m 之间,V 匝道最大为 11.15 m.

### 1.3 爆破方案

采用一次点火起爆,墩柱预先钻孔,炮孔内装导爆雷管,炮孔直径设计为  $D=70$  mm. 直径 1.2 m 的桥墩使用直径为 50 mm 的乳化炸药,其线装药密度为  $2.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ;直径 1.5 m 的桥墩使用直径为 60 mm 的乳化炸药,其线装药密度为  $3.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ . 间隔段采用水袋间隔,爆破飞散物采用覆盖防护和近体防护等防护措施.

### 1.4 地层条件

为了掌握爆破拆除对地基的影响,现场进行钻探勘察,共钻孔 41 个. 表层为素填土,厚度为 1.0~3.3 m 不等;第 2 层为淤泥,软塑~流塑状态,厚度为 5.4~20.1 m 不等;第 3 层为中砂或卵石层,厚度为 1.0~3.1 m;第 4 层为残积粘性土,厚度未揭露. 该场地淤泥层较厚,由于其工程性质较差,当桥梁爆破拆除坠落后,可能引起地基产生较大的变形,这是分析的重点.

### 1.5 监测方案

为了掌握桥梁拆除对地基、国防光缆和周边建筑物的实际影响大小,爆破前,在场地内对桥梁影响较大的地基和房屋位置埋设传感器. 同时,在场地布设了 20 个地面质点振动速度监测点(其中 1 监测点出了问题)、6 个深层水平位移监测点、3 个土体竖向位移(沉降量)监测点、2 个土压力监测点和 2 个孔隙水压力监测点.

除在爆破过程中进行振动加速度监测外,其余监测项目均在爆破拆除前测量一次结果,作为地基初始值;拆除后再测量一次,作为拆除后的数值. 取两次测量结果的差值,即可以得到爆破拆除对下部地基的影响大小.

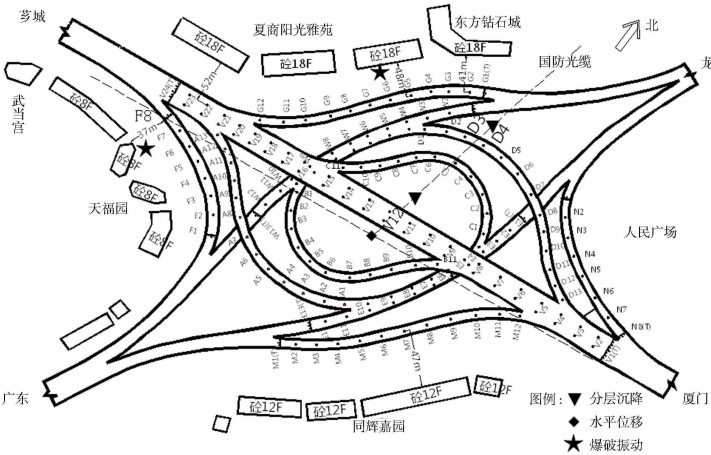


图 1 漳州市东立交桥周边建筑环境  
Fig. 1 Surrounding environment of east overpass of Zhangzhou City

2 建模思路

由于桥梁长度远大于宽度,所以取单位长度桥面为研究对象,即简化为二维平面问题. 文中重点分析 3 个桥墩处桥面对地基的影响:V12 桥墩、F8 桥墩和 D3~D4 桥墩. V12 桥墩处桥面高度和质量最大,对地基的冲击力也最大;F8 桥墩离房屋最近,离天福园小区最近为 37.0 m;D3~D4 桥墩下部地基 4.0 m 深度左右埋深有国防光缆,属重点保护对象. V12 桥墩,地表为 3.3 m 厚的素填土,下部为 16.8 m 厚的淤泥;F8 桥墩地表为 1.2 m 厚的素填土,下部为 13.4 m 厚的淤泥;D3~D4 桥墩地表为 0.6 m 厚的素填土,下部为 18.3 m 厚的淤泥,地下水位埋深位于 0.70~1.20 m 之间.

爆破拆除全过程包括 3 个工序:工序 1,在桥面坠落处施加动力荷载,模拟桥面下落对地面产生的冲击荷载作用,将冲击作用简化为简谐振动,频率为 10 Hz,作用为 0.05 s;工序 2,解除动力荷载作用,模拟冲击荷载作用后引起的地基扰动情况;工序 3,桥面堆载作用下对地基施加静力作用,发生相应的固结过程.

建模过程中,以秒(s)作为时间单位,为了避免反射波的干扰,设置尽量远的边界条件. 以 V12 断面为例,桥梁中心轴线距离一侧边界为 170 m,大于离同辉嘉园和夏商阳光雅苑的距离. 同时,使用吸收边界条件避免杂波的反射,在底部和左右两侧边界设置吸收边界. 对桥梁下部地基和建筑物地基进行网格加密. 静力堆载期间,将振动荷载进行冻结. 桥梁结构和下部地基土体的工程性质,如表 1 所示. 表 1 中: $\gamma$  为天然重度; $\gamma_{\text{sat}}$  为饱和重度; $E$  为弹性模量; $c$  为粘聚力; $\varphi$  为内摩擦角; $\mu$  为泊松比. 土体采用摩尔-库仑模型,由于加载时间极短,考虑不排水的情况.

表 1 桥梁结构和下部地基土体的工程性质  
Tab. 1 Engineering properties of overpass and foundation soil

材料名称	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$\gamma_{\text{sat}}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$E/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\mu$
钢筋混凝土	25.0	25.0	$3.0\times10^4$	—	—	0.20
素填土	18.1	19.4	4.0	15.0	17	0.35
粉质粘土	19.0	19.3	5.0	22.0	18	0.40
淤泥	16.7	18.0	0.5	11.0	8	0.45
中砂	19.1	19.7	30.0	0.3	22	0.33
残积粘性土	19.1	19.5	15.0	28.0	18	0.34

桥梁爆破拆除后,对下部地基产生瞬时冲击力,引起地基的瞬时沉降和水平位移,并且在地基内引起振动. 该冲击力瞬间达到峰值后迅速衰减至零,冲击力持续作用时间约在 0.03~0.06 s 之间,如图 2 所示. 桥梁对地基的冲击过程与强夯法处理地基的极为相似,故此冲击力峰值参照强夯法的计算方法,包括经典的 Mayne 法<sup>[6]</sup>、赵维炳改进的 Scott 法<sup>[7]</sup>和郭见扬法<sup>[8]</sup>等,采用 Mayne 法计算桥面坠落时的峰值应力,即

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{\pi a^2} \sqrt{\frac{32WHGa}{\pi^2(1-\mu)}}. \tag{1}$$

式(1)中: $P_{\text{max}}$  为桥面坠落时与地基土的接触峰值应力(kPa); $W$  为桥面质量(kN),由相应位置处单位宽度桥面的体积结合混凝土的密度求得; $H$  为桥面距地面的高度(m); $G$  为计算点对应土层的加权平均剪切模量(kPa); $a$  为桥面等效半径(m),由面积相等的原则等效求得; $\mu$  为计算点对应土层的加权平均泊松比.

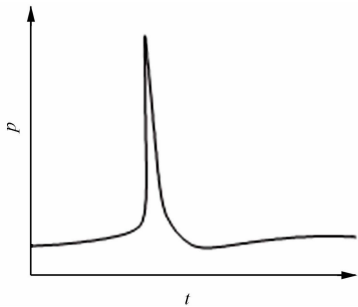


图 2 桥梁爆破拆除对地基的瞬间冲击力

Fig. 2 Instant impact force of blasted bridge on foundation

3 结果及分析

3.1 对周边房屋的影响

通过对土层界面和性质、场地边界条件、荷载条件和工序步骤等设定后,经 Plaxis 程序运行后,对结果进行分析. 考虑最不利的两处桥面对周围建筑物的影响,一处是 V12 桥墩处,其桥面高度为 11.15 m,宽度为 23.3 m,为荷载最大桥面,该桥墩离最近的建筑物为夏商阳光雅苑,最近距离为 11 m;另一处是 F8 桥墩处. 为了测量 V12 桥墩处实际的地基变形量,在距离其 25 m 远处布设了一测斜管和多点位

移计,用以测量地基的深层位移和沉降量.将各处地层、边界条件、荷载和计算工序等设置好后,进行计算分析,分析 V12 桥墩和 F8 桥墩处桥面堆载期间对下部地基及周边建筑物的影响,如表 2 所示.表 2 中: $D$  为深度; $S$  为地基沉降量; $L$  为地基水平位移; $V_{\max}$  为最近建筑最大波速; $a_{\max}$  为最近建筑最大加速度. V12 桥墩和 F8 桥墩处桥面堆载期间对下部地基及周边建筑物的影响,如表 3 所示.

表 2 V12 桥墩和 F8 桥墩处桥面坠落瞬间对下部地基及周边建筑物的影响  
Tab.2 Influence of deck fall on surrounding buildings and foundation at pier V12 and F8

桥墩号	$D/\text{m}$	$S/\text{mm}$			$L/\text{mm}$			$V_{\max}/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$		$a_{\max}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
		桥面中轴	监测点	最近建筑	桥面中轴	监测点	最近建筑	计算值	实测值	
V12	0	55.3	0.23	0.04	0	0.06	0.03	0.34	0.40	0.185
	3	10.4	0.08	0.03	0	0.06	0.02	0.20	—	$31.0\times 10^{-3}$
	9	0.23	0.02	0.01	0	0.05	0.01	0.07	—	$10.2\times 10^{-3}$
F8	0	24.2	—	$9.4\times 10^{-3}$	0	—	$2.5\times 10^{-3}$	0.03	0.27	0.025
	3	5.40	—	$2.5\times 10^{-3}$	0	—	$1.1\times 10^{-3}$	0.02	—	0.012
	9	0.02	—	$2.4\times 10^{-4}$	0	—	$1.4\times 10^{-4}$	0.02	—	0.007

表 3 V12 桥墩和 F8 桥墩处桥面堆载期间对下部地基及周边建筑物的影响  
Tab.3 Influence of static loading of deck on surrounding buildings and foundation at pier V12 and F8

桥墩号	$D/\text{m}$	$S/\text{mm}$				$L/\text{mm}$			
		桥面中轴	监测点		最近建筑	桥面中轴	监测点		最近建筑
			计算值	实测值			计算值	实测值	
V12	0	661.8	97.6	45.2	3.4	0	176.2	83.3	11.2
	3	586.4	82.1	32.2	2.2	0	164.2	65.4	7.7
	9	323.1	51.3	22.1	1.5	0	89.5	26.2	3.4
F8	0	32.3	—	—	0.3	0	—	—	0.6
	3	15.7	—	—	0.3	0	—	—	0.5
	9	8.5	—	—	0.2	0	—	—	0.3

3.2 对国防光缆的影响

该立交桥多条匝道下部地基埋设有国防光缆,以 D 匝道为例进行分析,该条匝道的 D3~D4 桥墩刚好下穿国防光缆,依据 Mayne 法计算的应力峰值为 270 kPa.为了测量桥梁爆破拆除对其实际影响,在离桥面边缘外侧 5.0 m 处埋设了一多点位移计测量桥面堆载的国防光缆处的竖向沉降量.按照上述方法建模,计算模拟得到该段桥梁拆除后引起的地基沉降量,如表 4 所示.表 4 中: $S_D$  为冲击瞬间; $S_S$  为静力堆载.

3.3 分析与评价

桥梁爆破拆除后对下部地基引起一定影响,V12 桥墩处坠落瞬间引起的地表沉降量为 55.3 mm,静力堆载时引起的沉降量达到 661.8 mm;F8 桥墩处桥面高度相当较小,桥面宽度仅为 9.50 m,且下部地质条件相对良好,故引起的地基变形量相对 V12 处的要小.桥梁拆除后,静力堆载期间,V12 桥面引起夏商阳光雅苑处的地表沉降量为 3.4 mm,水平位移量为 11.2 mm;F8 桥面引起的天福园地基沉降量和水平位移均小于 1.0 mm;D3~D4 段匝道可引起光缆处的沉降量达到 10 mm 左右.另外,比较不同深度和不同距离的计算,结果可以看出:1) 在桥面中心位置下、监测点处和最近建筑物处,土体的竖向沉降量和水平位移均随土体深度的增大而减小,即地表处的竖向位移和水平位移最大,利用计算模拟和现场测量的结果均揭示了这种规律;2) 距离桥面越远,其沉降量、水平位移、波速和最大加速度也越小,因此,只需分析桥面坠落对其最近建筑物的不利影响即可.

夏商阳光雅苑监测的最大波速与计算值较为接近,而天福园的最大波速监测结果比计算结果大不少.另外,静力堆载期间的地基竖向沉降和水平位移量计算结果是测量结果的 2~3 倍,国防光缆处的沉降量计算值与实测值则较为接近.造成这种误差的原因较多,包括桥面计算模型的简化、计算地层与实

表 4 D3~D4 段匝道爆破拆除引起国防光缆处地基的沉降量  
Tab.4 Foundation settlement at optical cable caused by blasting demolition between pier D3 to D4

$D/\text{m}$	$S_D/\text{mm}$	$S_S/\text{mm}$	
		计算值	实测值
0	34.2	60.7	—
2.0	15.4	32.6	—
4.0	8.4	10.7	7.7

际地层的差异和现场测量手段的限制等。

夏商阳光雅苑和天福园两个住宅小区,下部均采用桩基础,桩端位于下部基岩上。桥梁引起地基下沉对桩基产生负摩阻力,对桩基安全不利,但数毫米级的沉降量对桩基的影响较小;再者十余毫米的水平位移对桩基产生的水平力也较小,由此可以认定桥梁爆破拆除后引起地基变形对周边房屋的影响较小,这种影响可忽略不计。国防光缆处的地基沉降量计算值为 10.7 mm,参照 GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》<sup>[9]</sup>对于柔性管道变形安全的限定,其竖向位移报警值在 10~40 mm 之间。因此,对国防光缆的影响基本在安全范围之内。加上实际爆破时,采用减震、管线盖板等安全措施,可以认为对国防光缆的影响较小。

该次爆破的拆除对周边钢筋混凝土结构房屋产生的质点振动主频在 3.353~18.519 Hz 之间,该值小于 GB 6722—2014《爆破安全规程的标准》<sup>[10]</sup>值。当主频在 0~10 Hz 时,安全允许振速为 2.5~3.5 cm·s<sup>-1</sup>;当主频在 10~50 Hz 时,安全允许振速为 3.5~4.5 cm·s<sup>-1</sup>;当主频在 50~100 Hz 时,安全允许振速为 4.2~5.0 cm·s<sup>-1</sup>的下限值。由此可以认定,该次爆破产生的振动对钢筋混凝土结构房屋的影响在规程允许范围之内。

## 4 结论

- 1) 在桥面中心位置下、监测点处和最近建筑物处,土体的竖向沉降量和水平位移均随土体深度的增大而减小,且同一深度处,随离桥面水平距离的增大而减小。
- 2) 最大波速和地基变形的计算结果与测量结果,有的断面两者较为接近,有的相差较大,造成这种误差较大的原因包括桥面计算模型的简化、计算地层与实际地层的差异和现场测量手段的限制等。
- 3) 周边两栋高层住宅均采用桩基础,且桩端位于下部稳定基岩上,桥梁在住宅处引起数毫米级的沉降量和十余毫米的水平位移对桩基的影响较小,此种影响可以忽略不计;计算分析和现场测振均揭示,周边建筑物的最大波速小于安全允许波速。
- 4) 实际爆破拆除时,对现场开挖减震沟、桥面下铺设土体和轮胎进行减震,因此,文中分析的是更为不利的情况。实际拆除时,对下部地基、国防光缆和周边房屋的影响较小,在有关规范的允许范围之内。

## 参考文献:

[1] 杨元辉. 桥梁拆除爆破数值模拟研究[D]. 桂林: 广西大学, 2014: 35-44.

[2] 冯剑平, 黄平明, 孙海利, 等. 钢筋混凝土桥墩爆破拆除数值模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 214-219.

[3] 季杉, 王桂玲, 谢伟平. 高架桥爆破坍塌全过程数值模拟与分析[J]. 爆破, 2014, 31(4): 76-81.

[4] 杨永强, 胡进军, 谢礼立, 等. 沱阳高架桥爆破拆除塌落引起的地面振动特征[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 110-114.

[5] 蒋耀港, 沈兆武, 杨昌德. 市内复杂环境下大药量爆破降振及振动监测分析的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 156-161.

[6] MAYNE P W, JONES J, DUMAS J C, *et al.* Ground response to dynamic compaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(6): 757-772.

[7] 赵维炳. 设置砂井的软粘土地基动力固结[J]. 华东水利学院学报, 1984(3): 11-15.

[8] 郭见扬. 强夯地基附加应力估算方程初探[J]. 土工基础, 2007, 21(3): 80-84.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 24.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 42.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)