

爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究

张玉成¹，杨光华¹，胡海英²，姚捷³，姜燕¹

(1. 广东省水利水电科学研究院，广东省水利重点科研基地，广州，510610；
2. 珠江水利科学研究院，广州，510611；3. 武汉大学土木建筑工程学院，武汉，430072)

摘要：本文针对目前爆破荷载数值模拟中施加荷载方法的不足，在分析了各种荷载施加方法的特点及不同爆破数值模拟的目的和要求，基于圣维南荷载等效原理，提出了爆破荷载的等效施加方法，即将作用在炮孔壁上的爆破荷载等效后，施加在同排炮孔联心线或者面上，以模拟爆炸作用。等效方法的数值模拟结果表明，等效施加方法在近区存在一定差异，但在中远区吻合得较好。利用该等效荷载施加方法，分析了某沉管隧道基槽爆破施工对既有堤岸稳定性影响，分析结果与现场实测结果进行了比较，结果表明，等效方法和现场试验结果的位移和振速在量上比较接近，进一步说明等效荷载施加方法是合理的，该方法为爆破振动动力问题数值分析提供了借鉴作用，可供类似工程参考。

关键词：爆破；等效荷载；既有堤岸；稳定性；数值仿真

0 引言

伴随着 20 世纪科学、技术、经济的发展，交通运输、水利、水电、采掘，特别是城市地下交通及空间利用等，对隧道工程在数量和难度上提出了更高的要求。大规模的城市地下工程建设促进了爆破施工技术的进步，尤其近几年工程爆破的应用范围已由最初的采矿、修路发展到今天的城市大型建(构)筑物的拆除、隧道、沉管基槽、基坑的开挖以及城区道路和机场的平整建设等；爆破的环境也已由人烟稀少的荒郊野外转移到人口密集的城市。工程爆破的应用极大地降低了人们的劳动强度，加快了建设速度，提高了工作效率，节省了建设费用，技术与经济效果显著。但是随着爆破技术的广泛应用，人们越来越关注爆破对周围环境和建筑物造成的影响，尤其是爆炸时产生的冲击波、灰尘、震动等问题引起了人们的重视。

由于爆破环境的复杂性、爆破理论不成熟、爆破控制措施不合理而产生的一些爆破危害，爆破地震效应对爆区周围的建筑设施有不同程度的影响及破坏作用，例如建筑物出现裂缝、甚至倒塌，因其普遍性、复杂性、容易引起民事纠纷，尤其受到社会关注。因此爆破地震效应的影响、控制与减震是爆破工程中不容忽视的重要内容，它直接关系到爆破工程能否安全顺利的进行。

目前国内外学者[1~5]主要以不同工程背景和工况为基础，分析了爆破荷载作用下建筑物的动态响应，但用传统荷载施加方法，计算模型复杂，并计算非常耗时。本文结合具体项目研究一种爆破荷载的等效施加方法，将爆破荷载进行简化，简化后不仅和原来荷载施加方法得出的结果接近，而且又能大大简化建模工作量，减少计算。本文最后以广州洲头咀隧道为背景，采用简化后的等效荷载施加模式模拟爆破施工荷载，分析了洲头咀沉管隧道基槽爆破施工对既有堤岸稳定性影响，计算了周围不同位置、不同深度位置处的振动响应，并在此基础上，分析研究了减小爆破振动对既有结构物影响的减振措施，可为类似工程提供借鉴。

1 爆破振动效应的数值模拟分析

具体分析过程如下：

- 1) 根据工程地质条件、爆破施工方案等条件建立的有限元模型，对其进行模态分析，得到其固有频率和结构振型，得出堤岸结构的自振频率；
- 2) 然后进行爆破荷载作用下的瞬态响应分析，获取堤岸的位移和振速的分析，以及应力分布

等结果。

1.1 爆破荷载模拟方法及其施加^[6~8]

目前，爆破振动传播的数值模拟通常采用以下二种方法：

1) 使用 ANSYS 软件的 LS-DYNA 模块中内建的高性能炸药材料及其状态方程来模拟炸药的整个爆轰过程及爆轰产物与周围岩石介质的相互作用过程；

2) 在炮孔壁上直接施加半理论半经验的爆破荷载压力曲线(如三角型脉冲荷载或指数衰减型荷载等)，该荷载曲线可结合爆轰波理论和爆腔膨胀理论计算得到，依据工程经验和试爆破时实测结果来确定衰减函数的部分参数；

与后一种方法相比，第一种方法只能较好地模拟爆源附近区域的冲击响应问题，若用来研究中远区域的爆破振动传播问题，期望模拟从近区的炸药爆炸直至远区的爆破振动传播的整个过程，尚存在一定缺陷。

另外，第一和第二种方法要求模型中炮孔周围网格划分得十分细小，而对于尺寸较大的模型，如本项目爆破数值模拟的计算模型很大(长 550m×宽 460m×高 80m)，这使得网格划分后单元数量太多，严重时可能使得计算无法进行下去。

基于圣维南荷载等效原理，将爆破荷载转换成等效荷载后施加在炮孔连心线所在面上，该等效方法不需要在建模中体现出微小的炮孔形状，将同排炮孔连心线所在竖直面建成平面，假定单个炮孔壁上作用有爆破压力 P_0 ，炮孔半径为 r_0 ，孔间距为 a ，根据力和力矩平衡，可以将如图 1(a)所示作用在炮孔壁上的压力 P_0 ，等效施加在如图 1(b)所示的炮孔连心线上，需施加的等效压力为 P_e ：

$$P_e = \frac{2 r_0}{a} P_0$$

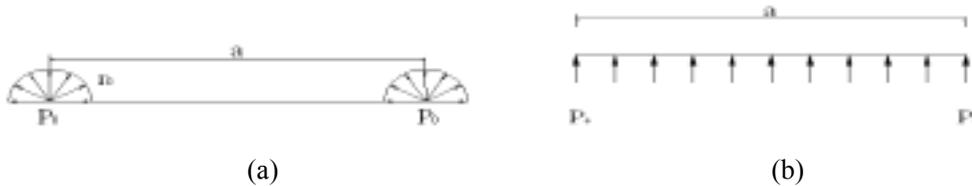


图1 爆破荷载等效施加示意图

1.2 爆破动力荷载的计算

根据 ANSYS 动力计算的特点，需要把计算所得的动荷载以等效荷载的方式加载于模拟炮孔的有限元网格节点之上。采用的爆破荷载计算模型为：

$$P(t) = P_m f(t) \quad (1)$$

式中： P_m ——为脉冲峰值，在不耦合连续装药条件下，初始应力峰值按照下式进行计算：

$$P_m = \frac{1}{8} \rho_e D^2 k_d^{-6} \eta \quad (2)$$

式中： ρ_e ——为装药密度； D ——为炸药爆速；

K_d ——是炮孔装药不耦合系数，不耦合系数指炮孔直径与药卷直径的比值，当炸药为不耦合空气间隔装药时，按体积等效原则来计算转换的药卷直径；

$K_d = d_b / d_c$ ， d_b ， d_c 分别为炮孔直径和等效药卷直径；

η 是爆轰气体碰撞孔壁时，压力增大的倍数，根据 K.K.安德列夫和 A.Φ.别辽耶夫的研究， $n = 8 \sim 11$ 。

$f(t)$ 通常取为指数型的时间滞后函数，一般是指指数衰减，计算可按三角形近似来处理，爆炸脉冲荷载作用时程曲线示意图如图 2。

近似为三角形冲击波如图 3 所示，荷载时间关系为：

$$P(t) = \begin{cases} P_m \frac{t}{t_{\text{升}}} \dots (0 \leq t \leq t_{\text{升}}) \\ P_m \frac{t_{\text{升}} + t_{\text{B}} - t}{t_{\text{B}}} \dots (t_{\text{升}} \leq t \leq t_{\text{升}} + t_{\text{B}}) \end{cases}$$

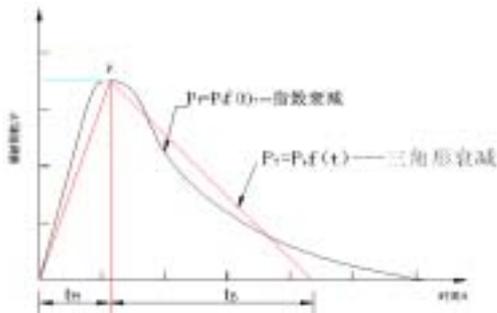


图 2 爆炸脉冲荷载作用时程曲线

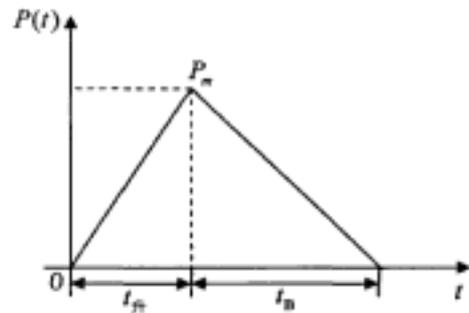


图 3 爆炸三角形脉冲荷载作用时程曲线

炮孔内爆炸荷载的作用时间，根据炸药参数(见表 1)和相关文献^[7]的处理办法，升压时间取为 100 μ s，正压作用时间为 600 μ s，爆破地震波的持续时间取为 0.6s。三角形冲击波荷载如图 7-3 所示。根据表 1 和公式(1)和(2)计算的爆破峰值压力 P_m 在 1.13~1.66GPa 之间。

表 1 爆破参数

炸药类型	型号	爆速(km·s ⁻¹)	炮孔直径(m)	等效药卷直径(m)	装药密度(g·cm ⁻³)
2号岩石乳化炸药	直径90mm,长度50mm,每条重3kg	3.50	0.105~0.115	0.072~0.084	1.00

1.3 等效荷载施加方法合理性验证

通过数值方法对比分析了直接在炮孔上施加爆破荷载和等效施加两种加载方式，计算模型见图 4 和图 5。

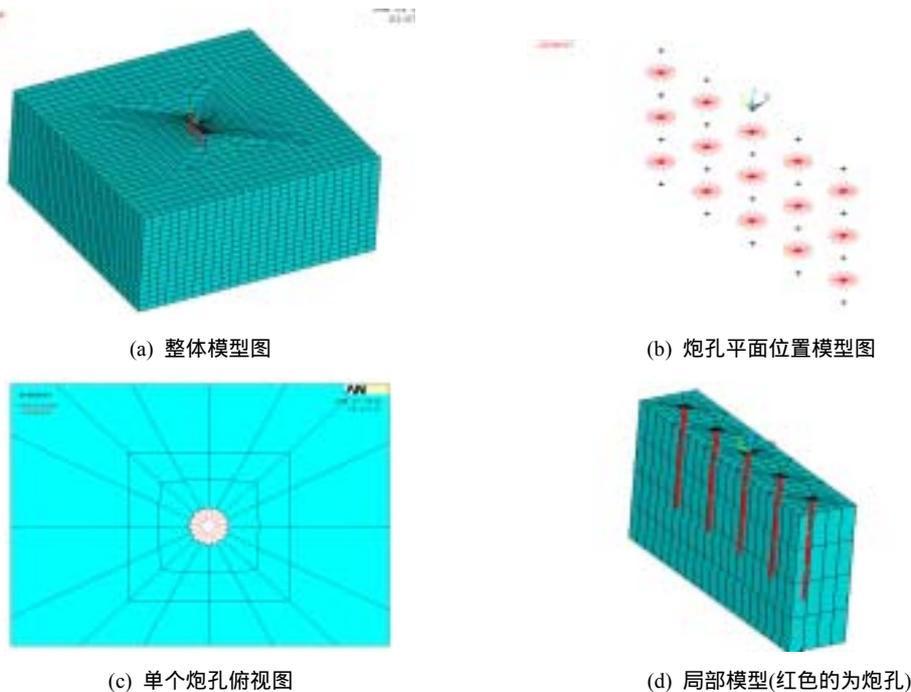


图 4 在炮孔上直接加爆破荷载压力曲线的计算模型

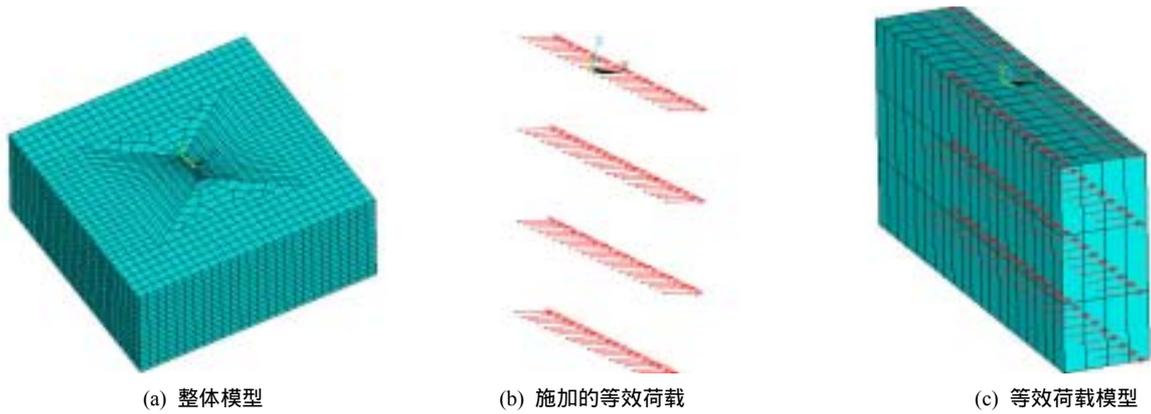


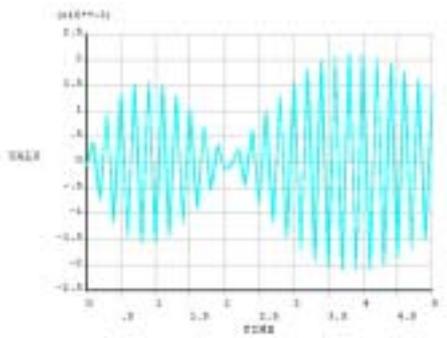
图 5 施加等效爆破荷载的计算模型

计算结果：

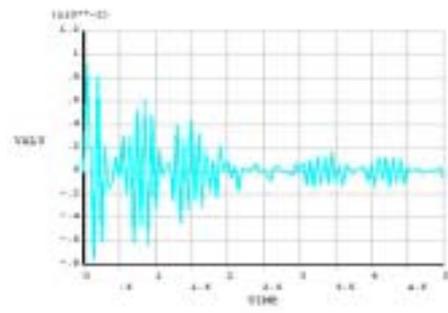
分别提取了距离爆破孔 5m、10m 和 40m 位置的计算结果，数值模拟结果表明，基于圣维南荷载等效原理的等效荷载施加方法在爆破孔近区存在一定差异，但在中远区吻合得较好，在炮孔 8m 外等效荷载和直接加载炮孔上的计算结果较接近，说明等效方法是合理的，并且等效荷载法建模简单，计算容易收敛。图 6~图 8 是计算结果。结果汇总见表 2。

表 2 两种不同加载方式计算结果汇总

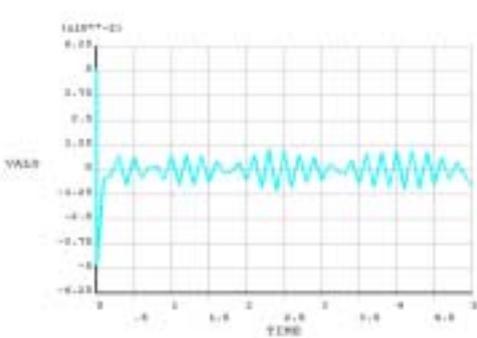
监测点到爆破孔 的距离(m)	不同加载方式计算的节点位移(mm)		不同加载方式计算的节点振速(cm/s)	
	爆破孔直接施加	施加等效荷载	爆破孔直接施加	施加等效荷载
5	2.1	6.4	1.25	3.80
10	1.8	2.0	0.8	1.1
40	1.5	1.6	0.3	0.37



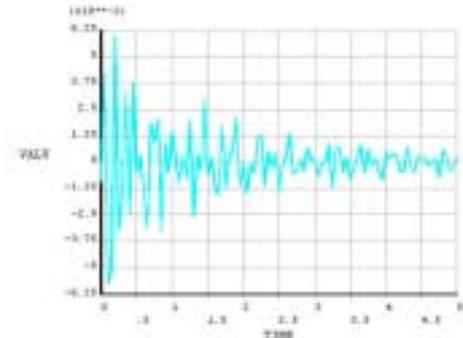
(a1) 5m 处节点位移，最大值 2.1mm(直接施加法)



(a2) 5m 处节点位移，最大值 6.4mm(等效荷载施加法)

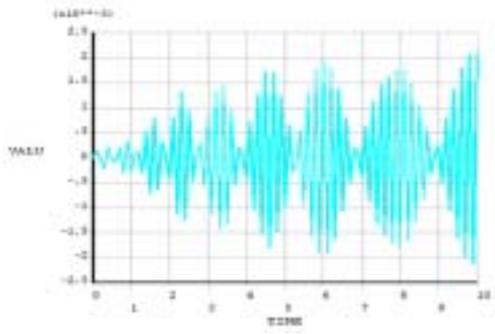


(b1) 5m 处节点振速，最大值 1.25cm/s(直接施加法)

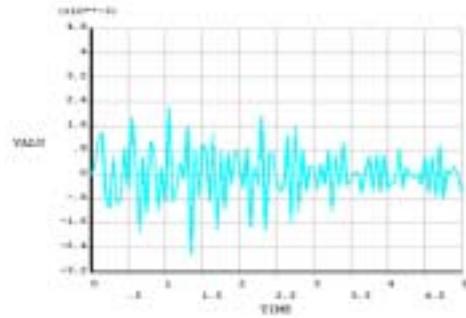


(b2) 5m 处节点振速，最大值 3.80cm/s(等效荷载施加法)

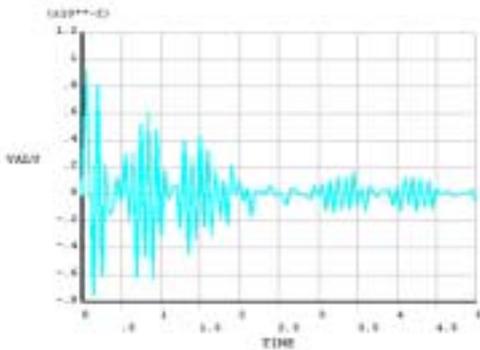
图 6 距离爆破孔 5m 位置的计算结果(2 种加载方式)



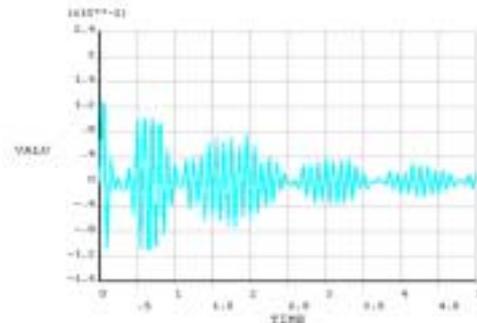
(a1) 10m 处节点位移, 最大值 1.8mm(直接施加法)



(a2) 10m 处节点位移, 最大值 2.0mm(等效荷载施加法)

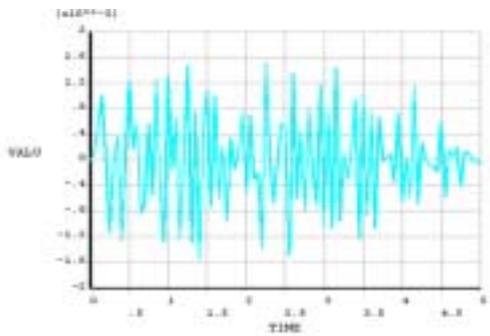


(b1) 10m 处节点振速, 最大值 0.8cm/s(直接施加法)

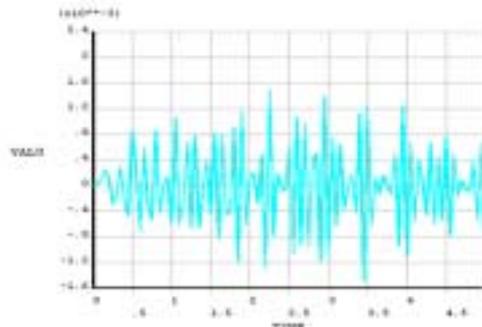


(b2) 10m 处节点振速, 最大值 1.1cm/s(等效荷载施加法)

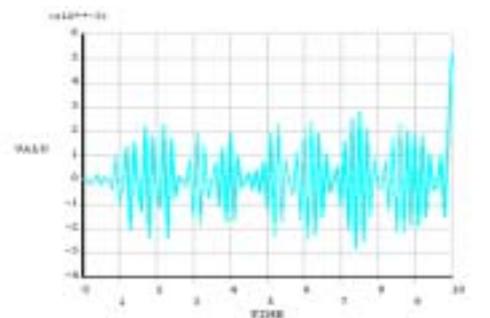
图 7 距离爆破孔 10m 位置的计算结果(2 种加载方式)



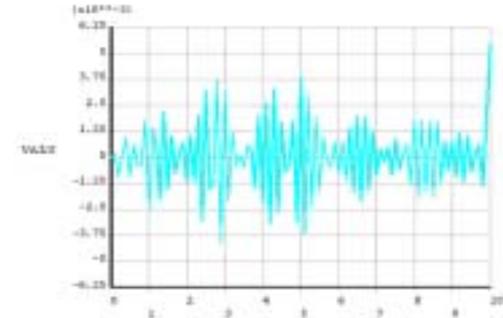
(a1) 40m 处节点位移, 最大值 1.5mm(直接施加法)



(a2) 40m 处节点位移, 最大值 1.6mm(等效荷载施加法)



(b1) 40m 处节点振速, 最大值 0.30cm/s(直接施加法)



(b2) 40m 处节点振速, 最大值 0.37cm/s(等效荷载施加法)

图 8 距离爆破孔 40m 位置的计算结果(2 种加载方式)

3 工程应用

3.1 工程概况

广州市洲头咀隧道工程是连接海珠区与荔湾区芳村之间的一条重要通道。它西连芳村的花蕾路,穿越珠江后东接海珠区的 T13 规划路。工程起点位于花蕾路与花地大道的交点,止点位于 T13 路与宝岗大道的交点,工程全长 3253.034m,, 具体平面位置见图 9。

隧道沉管段基槽在平面上全部处于直线上,在纵断面上处于一个“V”型坡上,基槽底宽 35.4~43.36m,沉管纵剖面见图 10。河床淤泥层下主要是全风化粉砂岩、全风化砂砾岩,强风化粉砂岩、强风化砂砾岩,平均厚度约 5.0m。



图 9 洲头咀隧道位置示意图

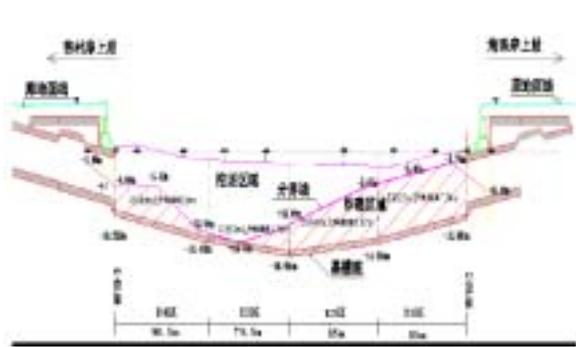


图 10 隧道沉管纵剖面图

由于临时系泊区距离既有堤岸较近,系泊区基槽坡顶距芳村堤岸的护岸结构最近距离 10m,需进一步明确系泊区基槽开挖对堤岸的影响;同时,临时系泊区和隧道基槽的开挖采用爆破方法,也需要分析其对既有堤岸的影响。

3.2 计算模型及参数选取

本计算模型的边界条件严格按照力学和数值分析原理来设置,所有结构构件和堤岸结构全部按照实际尺寸建模,根据其受力和变形特点来确定其边界条件,计算范围的外边界采取两种方式处理:其一非反射边界,其二为位移边界和力边界条件。

整体模型尺寸为:长 550m×宽 460m×高 80m,模型下边界往基槽底下延伸 50m,上下游外延 50m,芳村和海珠堤岸分别外延 60m。对整个模型四周外围和底部的面实施法向约束。整体模型尺寸图见图 11。等效荷载模型见图 12 和图 13。

建模时候岩土层及结构材料参数取值见表 3。

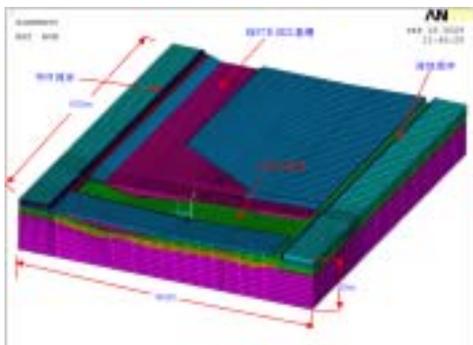


图 11 整体模型

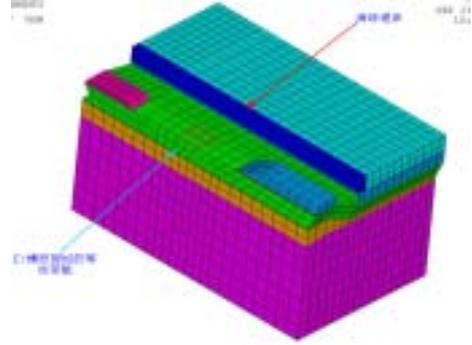


图 12 E1 沉管局部爆破荷载施加图

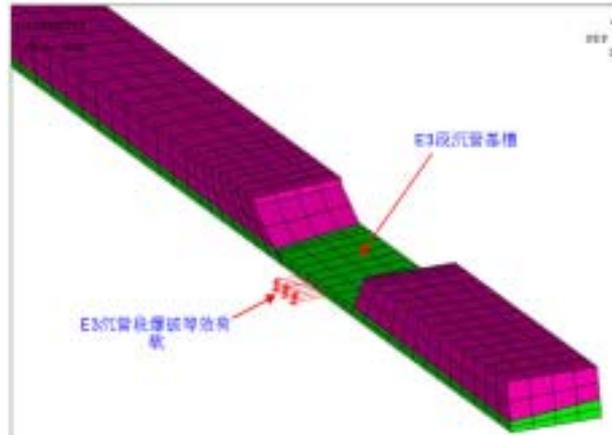


图 13 E3 沉管局部爆破荷载施加图

表 3 岩土体和堤岸结构参数取值表

计算 编号	地层 代号	岩土名称	天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	快剪强度		基床系数 K(MPa/m)	压缩模量 MPa(E_{s1-2})	弹性模量 $E_0(\text{MPa})$	泊松比 (μ)
				凝聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)				
1		填土	1.80	14	12.0	15	4.59	6.0	0.28
2		淤泥质粘土	1.63	6.0	7.0	8.0	2.76	2.0	0.35
3		细砂	1.90	0.0	23.0	9.4	/	25.0	0.29
4		亚粘土	1.90	21.0	17.0	32.0	4.93	20.0	0.27
5		全风化	2.00	28.0	20.0	50.6	5.66	35.0	0.26
6		强风化	2.00	30.0	25.0	104.2	/	150.0	0.25
7		弱风化	2.45	200.0	30.0	/	/	2000	0.20
8		微风化	2.50	750.0	35.0	/	/	5000	0.20
9	混凝土	C15	2.35	/	/	/	/	22000	0.17
10	混凝土	C20	2.40	/	/	/	/	25500	0.17
11	混凝土	C30	2.50	/	/	/	/	30000	0.17
12	回填砂	中粗砂	1.93	0.0	28.0	/	/	30.0	0.28

3.3 爆破荷载作用下的计算结果

由于总炮孔约 1.1 万个，全部建模分析也不可能，本项目主要是分析爆破对堤岸的影响，在分析中选择最不利工况进行分析，最不利工况选择的原则是：第一，爆破区域爆破孔距离堤岸最近，第二，在最近位置选择最大装药量的爆破点。

将前面计算的爆破脉冲荷载作用在模型上，进行相应的动力计算。

采用瞬态方法分析计算时，要取很短的时间步长 Δt ，为保证高阶振型的响应反映出来，时间步长 Δt 至少要小于所计入模型自振频率最高阶的周期 T 的 $1/10$ 。利用上一节的模态分析结果，来确定计算输入的时间荷载步。

计算结果见表 4，从表中可知，爆破荷载引起的堤岸最大位移为 2.3mm，最大振速为 2.4cm/s。

表 4 不同区域爆破荷载最不利工况对既有堤岸的影响分析结果汇总表

爆破位置	最不利工况 距离芳村堤 岸最近距离 (m)	最不利工况 距离海珠堤 岸最近距离 (m)	最大段别 药量(kg)	计算荷载采 用的最大药 量(kg)	爆破荷载引起的堤岸		
					最大位移值 (mm)	最大振速 (cm/s)	最大附加应 力 (MPa)
E1 段	255	28	20.1	85.2	2.3	2.4	0.019
E2 段	171	84	40.0	200.0	1.7	1.8	0.010
E3 段	80	170	40.0	162.0	1.2	1.4	0.009
E4 段	25	255	15.0	60.0	1.6	2.0	0.008
系泊区	22	286	48.0	48.0	1.8	2.2	0.012

3.4 现场试验结果

为了有效的了解和控制水下爆破振动对临近建(构)筑物的危害，在大范围爆破前进行试爆试验是非常必要的，通过试爆破振动测试，可以分析和掌握爆破地震波的特征、传播规律、验证等效荷载施加模型结果的合理性，现场试爆位置见图 14。

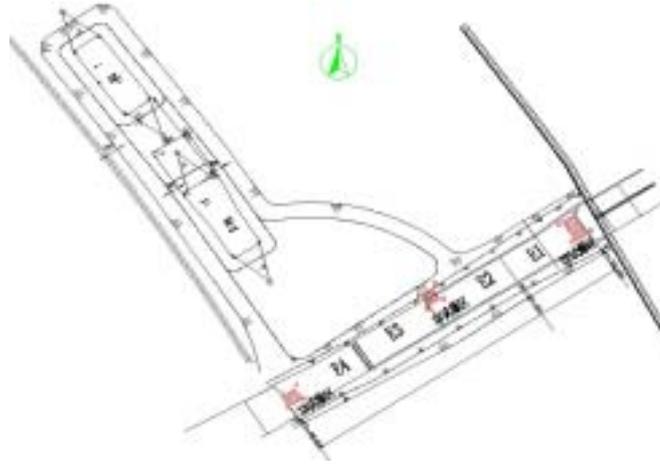


图 14 试爆区域平面位置

现场测试结果见表 5 和表 6，结果表明，爆破施工引起芳村堤岸的振速在 0.1~2.09cm/s，最大振速为 2.09cm/s，引起的芳村堤岸的位移 1.0~3.0mm，最大位移为 3.0mm，小于安全振速控制标准(4.2cm/s)。

表 5 实测的芳村堤岸振动速度(2#试爆区)

测点编号	测点距离 1#爆破区域中心的距离(m)	单段最大炸药量 Q(kg)	起爆总装药量 Q _总 (kg)	测点振动速度 V(cm/s)
V1	190	47	200	0.92
V2	209	47	200	0.79
V3	227	47	200	0.69
V4	307	47	200	0.43
V5	360	47	200	0.33
V6	415	47	200	0.26

表 6 实测的芳村堤岸振动速度(3#试爆区)

测点编号	测点距离 3#爆破区域中心的距离(m)	单段最大炸药量 Q(kg)	起爆总装药量 Q _总 (kg)	测点振动速度 V(cm/s)
V1	69	35	140	2.09
V2	116	35	140	0.82
V3	155	35	140	0.49
V4	258	35	140	0.19
V5	319	35	140	0.13
V6	377	35	140	0.10

3.5 试验结果与数值结果对比分析

表 7 是数值和试验结果汇总表，对比分析爆破点距离监测点的距离、最大段别药量等参数可以发现，数值法和现场试验得到的位移和振速在量上比较接近，进一步说明等效荷载施加分析方法是合理的。

表 7 数值和试验计算结果汇总表

数值方法计算结果					现场试验结果							
爆破位置	距离芳村堤岸最近距离(m)	最大段别药量(kg)	最大位移值(mm)	最大振速(cm/s)	测点编号	距离1#爆破区距离(m)	单段最大炸药量Q(kg)	测点振动速度V(cm/s)	测点距离3#爆破区距离(m)	单段最大炸药量Q(kg)	测点振动速度V(cm/s)	堤岸位移(mm)
E1 沉管段	255	20.1	2.3	2.4	V1	190	47	0.92	69	35	2.09	2.0
E2 沉管段	171	40.0	1.7	1.8	V2	209	47	0.79	116	35	0.82	2.0
E3 沉管段	80	40.0	1.2	1.4	V3	227	47	0.69	155	35	0.49	1.0
E4 沉管段	25	15.0	1.6	2.0	V4	307	47	0.43	258	35	0.19	1.0
系泊区	22	48.0	1.8	2.2	V5	360	47	0.33	319	35	0.13	1.0
					V6	415	47	0.26	377	35	0.10	1.0

4 结论与建议

本文结合爆破数值模拟中爆破荷载的特点，分析了各种荷载施加方法的特点及爆破震动场模拟的要求，基于圣维南荷载等效原理，提出了爆破荷载的等效施加方法，即将作用在炮孔壁上的爆破荷载等效后，施加在同排炮孔联心线或者面上，以模拟爆炸作用。数值模拟结果表明，等效施加方法在近区存在一定差异，但在中远区吻合得较好。利用该等效荷载施加方法，采用三维实体模型计算分析了某沉管隧道基槽爆破施工对既有堤岸稳定性影响，结果表明，数值法和现场试验得到的位移和振速在量上比较接近，进一步说明等效荷载施加分析方法是合理的，该方法为爆破振动动力问题数值分析提供了提供些借鉴作用，可供类似工程参考。

参考文献

- [18] 高金臣. 爆破荷载在岩体中引起应力波的传播理论与实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1987.
GAO jin-cheng. Dynamic caustics analysis of crack in sandwich materials under blasting stress wave[D]. XUZHOU: China University of Mining and Technology, 1987.
- [19] 史维升. 不耦合装药条件下岩石爆破的理论研究和数值模拟[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2004.
SHI Wei-sheng. Numerical Simulation and Theory Study Of Roek Blasting without Interaction Charge[D]. WUHAN: wuhan university of science and technology, 2004.
- [20] 张建华, 李世禄, 王玉杰, 等. 爆炸扩腔数值模拟及分析[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 174-177.
Zhang Jian-hua, Li Shi-lu, Wng Yu-jie. Numerical simulation of springing blasting in stemmed hole[J]. Journal of Wuhan Yejin University of Science and Technology, 2001, 24(2): 174-177.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
Xu Zhi -lun. Elasticity Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [22] 郭学彬, 肖正学, 张志呈. 爆破振动作用的坡面效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 83-87.
Guo Xue-bin, Xiao Zheng-xue, Zhang Zhi-cheng. Slope effect of blasting vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 83-87.

- [23] 周春锋. 城市浅埋隧道开挖减震控制爆破技术[J]. 工程爆破, 2001,7(1) : 57-61.
Zhou Chun-feng. Vibration-reducing controlled blasting technology for excavation of urban shallow tunnel[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1):57-61.
- [24] 许红涛,卢文波,周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008,41(1) : 67-71.
- [25] XU Hongtao, LU Wenbo, ZHOU Xiaoheng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008,41(1) : 67-71.
- [26] 李强. 消力池爆破开挖对红石大坝影响的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2007.
Li Qiang. Numerical simulation of the impact on Hong-shi Dam due to blasting excavation of stilling pool[D]. Dalian: Dalian university of technology, 2007.
- [27] 《爆炸法处理水下地基和基础技术规程》(JTJ/T258)
《technical specifications for the methods of explosive in treating with underwater foundation and base》(JTJ/T258)
- [28] 《水运工程爆破技术规范》(JTS204-2008)
《Code for blasting technics in water transport engineering》(JTS204-2008)
- [29] 《爆破安全规程》(GB6722-2003)
《Safety regulations for blasting》(GB6722-2003)