

文章编号:1671-6833(2007)03-0028-05

子模型技术在混凝土箱梁悬臂板分析中的应用

张 岗¹, 王新敏², 贺拴海¹

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 石家庄铁道学院 大型结构所, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 结合子模型技术, 通过大型有限元程序分别建立实体单元模型及板壳单元模型, 进行数值仿真分析. 研究子模型技术在混凝土箱梁悬臂板实体单元建模分析中的3种方法及实施技巧, 考察悬臂板根部内力的影响因素: 厚度、长度、箱梁畸变及荷载作用位置. 结果表明: 子模型区域宽度越接近悬臂板有效分布宽度, 子步法和混合网格法计算结果越准确, 效率高; 对于有效梁段法, 3倍于有效分布宽度的梁段为计算精度和计算时效的最佳尺度. 实体单元建模综合考虑影响因素, 其分析结果相对于板壳单元分析结果及其它算法更接近试验结果, 子模型技术适合于混凝土箱梁悬臂板局部精细分析.

关键词: 桥梁工程; 混凝土箱梁; 悬臂板; 有限元; 子模型技术

中图分类号: U 448.23 TU 311.41 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 长悬臂板混凝土箱梁越来越受到设计单位的重视, 如何对混凝土箱梁的长悬臂板进行分析计算就显得尤为重要^[1-2]. 传统分析方法通常用板壳单元、块壳组合单元或者更简化的模型(根部固结或根部简化为刚度很大的弹簧)来模拟悬臂根部的内力分布状况^[3-5], 所有这些方法虽简单易算, 却都没能对混凝土箱梁悬臂板进行空间应力分析, 未能完全明晰悬臂板受作用后其根部应力的空间分布形式. 笔者应用大型有限元分析软件 ANSYS, 采用 20 节点实体单元 (SOLID95) 对混凝土箱梁悬臂板进行数值仿真分析研究, 并总结子模型技术在实体单元建模及局部精细分析中的技巧.

1 实体单元分析方法

1.1 等参元坐标转换

引入一种高精度单元——等参数单元^[6]. 它既能简化复杂单元的划分工作, 又能满足求解精度. ANSYS 的实体单元 95 (SOLID95) 就是 20 节点等参数单元.

如图 1 所示, 将空间任意曲边六面体(实际单元图 b) 变换成 ξ, η, ζ 坐标中边长为 2 的单位立方体(基本单元图 a).

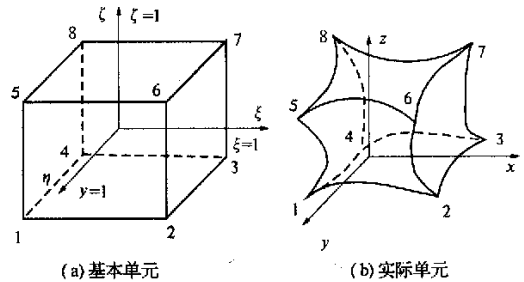


图 1 等参元坐标转换

Fig. 1 Coordinate transition for isoparametric element

其位移模式及坐标变换公式取为:

$$\begin{cases} U \\ V \\ W \end{cases} = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta) \begin{cases} u_i \\ v_i \\ w_i \end{cases}$$
$$\begin{cases} X \\ Y \\ Z \end{cases} = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta) \begin{cases} x_i \\ y_i \\ z_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_i, v_i, w_i 为节点位移值; x_i, y_i, z_i 为节点坐标值; n 为单元总数; N_i 为形状函数, 是结点位移与单元中任意点处位移的转换矩阵.

由于对位移模式和坐标变换公式采用等同的形函数, 这个实体单元就称为等参数单元. 可以证明, 如果位移模式在基本单元中充分反映刚体位移和常量应变, 则它在等参数单元中也能充分反映刚体位移和常量应变.

收稿日期: 2007-03-19; 修订日期: 2007-05-21

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2006000389)

作者简介: 张 岗 (1980-), 男, 甘肃庆阳人, 长安大学博士研究生, 主要从事桥梁结构理论与空间分析方面的研究.

1.2 实体单元内力处理

众所周知,用实体单元建模易得到单元节点应力,却无法直接得到截面内力,给截面设计带来一定困难.下面介绍2种实体单元内力求法.

(1) 积分点应力求和法:进入后处理层,定义路径名(PATH),建立路径几何(PPATH),映射积分路径上的应力(PDEF),对积分路径内应力积分(PCALC),便可得到相应积分区域内的内力.其基本原理如下:

假定在宽度方向同高度纤维应力相同,某宽度 b_0 的弯矩可表示为如下广义积分式.

$$M = b_0 \times \int \sigma z_i \times s_i \times ds \quad (2)$$

式中: s 为路径长度变量; σz_i 为某积分点应力; b_0 取单位宽度;若 σz_i 在某积分点取最大应力,可得单宽弯矩峰值.

(2) 面操作法:进入后处理层,移动工作平面、创建面(SUCR),映射各个方向应力(SUMAP),显示面本身、面项 MYSZ、矢量显示应力(SUPL),求截面内力(SUEVAL).

2 混凝土箱梁悬臂板有限元模型的建立

2.1 子模型技术

子模型是一种先总体、后局部的分析技术,也称为边界条件切割技术.基本思路:建立总体分析模型,并忽略模型中的局部细小特征,如导角、开孔、开槽等(因圣维南原理,模型的局部细小改动并不特别影响模型总的分析结果),同时在该大模型上划分较粗的网格(计算和建模的工作量均较小),施加荷载并完成分析^[6-7];其次在与总体模型相同的坐标系下建立局部模型,此时将前面忽略的细小特征加上,并划分精细网格(模型的切割边界应和关心区域保持一定距离),用 CBD-OF 等系列命令自动将前面总体模型的计算结果插值作为该模型的边界条件,进行求解计算.

2.2 单元影响分析

单元划分直接影响模型是否可用,影响计算精度.权衡计算时效和计算结果的可靠度,有必要对单元划分进行分析,如图2(a)和图2(b)所示.实体单元(SOLID95)建模,采用混合网格(即在几何模型上,根据各部位的特点,分别采用自由、映射、扫略等多种网格划分方式,形成综合效果尽量好的有限元模型,以保证单元之间的协调性)进行划分.在跨中悬臂板单侧边缘施加集中荷载 $P=200\text{ N}$ 求解.表1给出悬臂板根部单宽弯矩峰值、计算时效及计算相对偏差.

万方数据

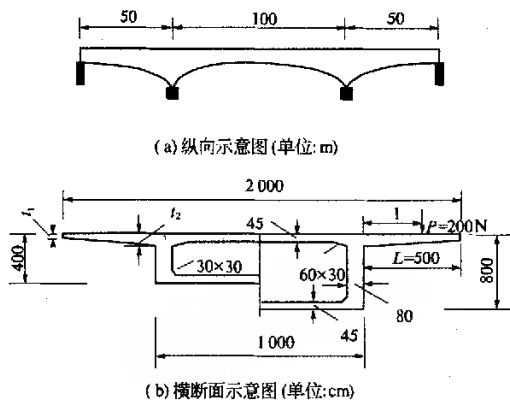


图2 三跨连续箱梁图示

Fig.2 Three span concrete box bridge

表1 单元尺寸对计算结果的影响

Tab.1 Influence of different element on dimension calculation results

单元尺寸 /m	单宽弯矩峰值 /(N·m)	计算时效 /min	计算相对 偏差/%
5	28.420	30.34	-64.486
4	48.282	45.26	-39.667
3	57.490	68.97	-28.159
2	68.124	137.70	-14.871
1	78.316	389.23	-2.134
0.5	80.024	2475.38	0
子模型	78.284	40.56	-2.174

表1中以单元长度0.5m计算得到的单宽弯矩峰值为标准,其它单元尺寸下计算得到的数值与此比较,可见,采用子模型技术(子模型区域内单元尺寸为1m)计算结果可靠,时效高,适合实体单元模型的局部精细分析.

2.3 子模型分析方法及实施技巧

拟3种方法对子模型技术加以实施.

(1) 子步法:先将梁的整体用较粗的网格加以划分,进行运算,得到有效分布宽度边界处内力和变形条件,保存成子步文件.继而,用较密的网格对有效分布宽度范围内的悬臂板进行细分,调用先前保存下来的边界条件,再进行局部精细分析.

(2) 混合网格法:先对有效分布宽度范围内的悬臂板用较细的网格划分,远离此区域的悬臂板用粗的网格划分,已划分网格区域之间用过渡网格划分,再对整体模型进行分析(如图3所示).

(3) 有效梁段法:为节省建模时间和计算工

作量,可依据子模型原理选择梁段(至少 3 倍于有效分布宽度),对梁段截取边界固结,对有效梁段进行精细分析.

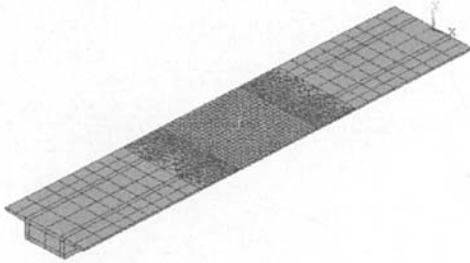


图3 混凝土箱梁悬臂板局部精细分析图
Fig.3 Partially fine analysis for concrete box bridge cantilever plate

子模型技术在混凝土箱梁悬臂板数值仿真分析中有一定的实施技巧(见图4).图4中 S_w 为子模型区域宽度; E_w 为荷载有效分布宽度; L 为悬臂板长度; B 为桥面宽度.

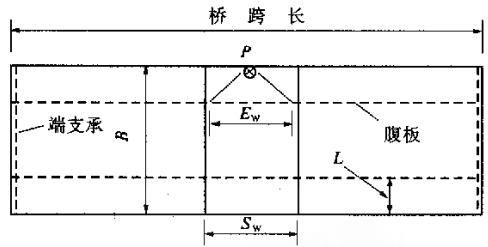


图4 子模型技术实施技巧
Fig.4 Application skill for sub - model technology

如图2(a)和图2(b)所示,SOLID95 建模,采用不同宽度的子模型区域对悬臂板进行局部精细分析,在跨中悬臂板单侧边缘施加集中荷载 $P = 200\text{ N}$ 求解,由文献[8]得荷载有效分布宽度 $E_w = 12.774\text{ m}$.表2给出悬臂板根部单宽弯矩峰值、计算时效及相对精度.

表2 子模型技术分析方法的比较
Tab.2 Analysis for implement programme of sub - model technology

子模型区域 域计算宽度/m	子步法			混合网格法			有效梁段法		
	单宽峰值 /(N·m)	计算时效 /min	相对精度 /%	单宽峰值 /(N·m)	计算时效 /min	相对精度 /%	有效梁段 长度	单宽峰值 /(N·m)	计算时效/min
100	78.312	272.65	0	78.316	389.23	0	100	78.315	97.21
20	77.302	53.62	-1.290	77.301	67.98	-1.296	60	78.389	42.36
15	78.281	45.81	-0.039	78.284	46.33	-0.041	40	79.954	35.78
10	78.116	44.59	-0.251	78.114	45.80	-0.258	30	91.445	27.52
5	75.334	37.93	-3.803	75.335	44.48	-3.781	20	127.527	18.65

分析表2说明:采用3种方法,子模型区域宽度对悬臂板根部单宽弯矩峰值和计算时效的影响较大.以子模型区域宽100 m的计算精度为标准,分析其它子模型区域宽度下的相对精度和计算时效.对于子步法和混合网格法,子模型区域宽度越接近悬臂板有效分布宽度,计算结果越准确,效率也高;对于有效梁段法,3倍于有效分布宽度的梁段为计算精度和计算时效的最佳结合.

3 混凝土箱梁悬臂板有限元分析

在跨中悬臂板单侧边缘施加集中荷载,分析变厚度(t_2/t_1)悬臂板根部内力分布状态.如图2所示,悬臂板长度为 L ,悬臂板根部厚度 t_2 ,自由端厚度 t_1 ,荷载作用点距悬臂板根部距离 l ,悬臂板的4个参数(L, l, t_2, t_1)随计算条件取值不同,荷载 $P = 200\text{ N}$.采用SOLID95和Shell63分别建模分析.将悬臂板实体单元分析的结果与板壳单元方数据

元的结果做对比如表3、表4所示.

分析表3和表4表明:实体单元建模(考虑箱梁畸变),其结果明显小于板壳单元(未考虑畸变)分析的结果.根部单宽弯矩峰值随悬臂板长度变短而减小;荷载作用点到悬臂板根部的距离变小时,悬臂板根部单宽弯矩峰值减小;根部单宽弯矩峰值随悬臂板坡度变大而明显增加;悬臂板坡度越大,抵抗畸变能力越强,单宽弯矩峰值增加.

4 试验分析

4.1 试验模型

图5给出两混凝土箱梁梁段悬臂板试验模型,用光纤测试技术对其悬臂板根部应变进行测试,计算内力,结合混凝土网格法和有效梁段法分析.试验模型力学和几何参数如下:

表 3 不同长度悬臂板根部单宽弯矩峰值分布

Tab.3 Distribution for single width moment peak of different length cantilever plate

悬臂板 长度 L/m	$t_2/t_1 = 1$		$t_2/t_1 = 2$		$t_2/t_1 = 3$	
	实体分析 / (N·m)	板壳分析 / (N·m)	实体分析 / (N·m)	板壳分析 / (N·m)	实体分析 / (N·m)	板壳分析 / (N·m)
5.0	78.284	97.296	107.015	129.745	120.868	137.727
4.0	76.021	93.727	104.847	130.209	118.716	145.927
3.0	73.856	92.596	101.878	130.614	115.964	149.649
2.0	66.437	88.841	99.359	131.487	113.718	151.029
1.0	87.511	89.661	95.849	136.819	113.145	197.468

表 4 偏载位置不同时悬臂板根部单宽弯矩峰值分布

Tab.4 Distribution for single width moment peak of different load point on cantilever plate

l/L ($L=5\text{m}$)	$t_2/t_1 = 1$		$t_2/t_1 = 2$		$t_2/t_1 = 3$	
	实体分析 / (N·m)	板壳分析 / (N·m)	实体分析 / (N·m)	板壳分析 / (N·m)	实体分析 / (N·m)	板壳分析 / (N·m)
1	78.284	97.296	107.015	129.745	120.868	137.727
0.8	65.909	85.488	93.324	113.284	105.153	118.608
0.6	54.054	75.580	80.232	99.984	90.114	101.316
0.4	41.535	67.230	66.778	85.601	74.703	83.633
0.2	25.406	59.000	51.834	72.772	57.678	68.532

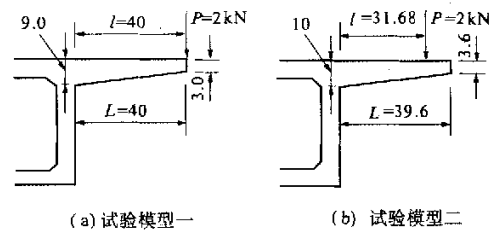


图 5 混凝土箱梁悬臂板试验模型 (单位:cm)

Fig.5 Test model for concrete box bridge cantilever plate

图 5(a) 和 (b) 试验模型分别为长 4.2 m 和 3.8 m 的等高度等截面混凝土箱梁梁段模型, 两模型梁段顶底板厚度均 8 cm, 采用 50 号混凝土浇筑成形。

图 5(a) 混凝土箱梁端部设置 15 cm 厚的横隔板, 梁高度为 108 cm, 桥面宽 190 cm, 箱宽

110 cm, 悬臂板宽 40 cm。
图 5(b) 混凝土箱梁端部设置 13 cm 厚的横隔板, 其余部位均不设横隔板, 梁高度为 90 cm。桥面宽 174.2 cm, 箱宽 95 cm, 翼缘板长 39.6 cm。

4.2 结果分析

表 5 是对两梁段试验模型分别采用 4 个工况进行分析的结果, 其中每个工况相对应荷载作用于悬臂板不同位置。

分析表 5 说明: 美国 AASHTO 规范公式计算得到的悬臂板根部单位宽度弯矩峰值几乎是试验结果的 2 倍, 可接受程度很低; 桥规公式 (JTJ-62-2004) 和魏斯特加公式及沙柯公式均未考虑影响悬臂板根部内力的诸多因素, 计算结果不可靠; 实体单元建模考虑箱梁畸变, 其分析结果比板壳单元分析更接近试验结果。

表 5 试验模型分析结果比较 (单宽弯矩峰值)

Tab.5 Analysis for the calculation results of test model bridges

工况 分析	l/L	试验数据 / (N·m)	实体单元分 析 / (N·m)	板壳单元分 析 / (N·m)	桥规公式 ^[8] / (N·m)	沙柯公式 ^[8] / (N·m)	魏斯特加公 式 ^[8] / (N·m)	美国 AASHTO 规范 公式 ^[8] / (N·m)
试 验 一	1.0	1 101.21	1 187.16	1 413.23	1 000	910.82	636.94	1 842.04
	0.8	900.34	989.11	1 197.51	1 000	811.66	636.94	1 728.33
	0.6	753.26	816.54	1 014.72	1 000	726.11	636.94	1 567.09
	0.4	615.42	663.27	865.26	1 000	662.42	636.94	1 320.68
试 验 二	1.0	1 050.27	1 168.12	1 398.90	1 000	910.82	636.94	1 837.16
	0.8	855.89	923.27	1 131.97	1 000	811.66	636.94	1 723.14
	0.6	743.07	803.71	1 019.54	1 000	726.11	636.94	1 561.21
	0.4	629.28	673.75	871.78	1 000	662.42	636.94	1 314.41

5 结论

(1) 子模型技术分 3 种分析方法实施,子模型区域宽度与悬臂板有效分布宽度接近时,子步法和混合网格法计算结果相近,准确度高;对于有效梁段法,选取 3 倍于有效分布宽度的梁段,计算精度和计算时效可接受程度高。

(2) 通过模型分析与试验结果比较,箱梁畸变、悬臂板坡度、悬臂板长度及荷载作用位置影响悬臂板根部内力的分布形式。结合子模型分析技术,采用实体单元分析比采用板壳单元及其它算法分析的更准确、快捷。

参考文献:

[1] 周勇军,赵小星,贺拴海,等.弯钢箱梁桥的动力分析及模态试验[J].郑州大学学报(工学版),2005,

26(4):20-24.

- [2] 何福照,吴德心.箱梁理论[M].北京:人民交通出版社,1988.
- [3] 徐利平.箱形悬臂板的简化分析[J].上海公路,2001,(2):18-21.
- [4] 蒋志刚.单箱室脊骨梁悬臂行车道板计算理论与试验研究[D].上海:同济大学,1988.
- [5] 韩大建,梁立农,徐郁峰,等.珠江大桥有限元仿真分析[J].桥梁建设,2004,(3):34-37.
- [6] 张立明. Algor、Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [7] 徐伟,李智,张肖宁.子模型法在大跨径斜拉桥桥面结构分析中的应用[J].土木工程学报,2004,37(6):30-34.
- [8] 贺拴海.桥梁结构理论与计算方法[M].北京:人民交通出版社,2004.

Application for Sub - model Technology in Analysis of Concrete Box Bridge Cantilever Plate

ZHANG Gang¹, WANG Xin - min², HE Shuan - hai¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Railway Institute of Shi Ji - zhuang, Structural Health Monitoring and Control Institute, Shi jia - zhuang 050043, China)

Abstract: Combining the sub - model analysis technology, concrete box bridge cantilever can be carried on simulation analysis with solid and shell elements. In this essay the utility skill and three scheme of the sub - model are studied, meanwhile, influence factors of inner force are generalized. The results indicates that the analysis results for sub step and mixed mesh is effective when the sub - model field is similar to the effective distribution width, in order to get ideal results the length for the girder portion is equal to three times' of the effective width. Comparing to the test results, the analysis results by solid elements determine its applicability and accuracy under the condition of combining the sub - model technology relative to shell elements and other analysis methods.

Keyword: bridge engineering; concrete box bridge; cantilever plate; the finite element; Sub - model technology