

文章编号: 1002-0268 (2004) 01-0051-04

外白渡桥工作状态模拟与使用安全评估

王春生¹, 徐 磊², 陈惟珍², 陈艾荣²
(1. 长安大学桥梁与隧道陕西重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在对桥梁档案进行详细调查基础上, 初步建立了外白渡桥工作模型, 进而与 1991 年、2000 年的实测结果进行对比来校正工作模型, 最终建立了反映实际受力性能的三维力学模型。在实桥工作状态模拟的基础上, 联合应用传统疲劳分析和工程断裂力学计算该桥剩余寿命, 并给出确保外白渡桥使用安全的检测间隔和维修策略。
关键词: 外白渡桥; 三维力学模型; 剩余寿命; 使用安全评估
中图分类号: U448.23 **文献标识码:** A

3D Finite Element Model and Service Safety Assessment of Waibaidu Bridge

WANG Chun-sheng^{1,2}, XU Lei¹, CHEN Wei-zhen¹, CHEN Ai-rong¹
(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel Engineering of Shaanxi, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China;
2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A 3-dimensional finite element model which can reflect the actual mechanic performance is established on the basis of the existing bridge archives and through the calibration with the in-situ measured values of 1991 and 2000. Then a combined approach with the conventional fatigue analysis and the fracture mechanics based concept is presented in this paper. With this method the remaining fatigue life and service safety of Waibaidu Bridge were calculated. According to the calculation results the inspection interval and maintenance management strategy were suggested.
Key words: Waibaidu Bridge; 3D finite element model; Remaining fatigue life; Service safety assessment

建于 1907 年的外白渡桥是一座跨越苏州河的钢桁架桥, 该桥不仅是老上海的历史见证, 又是国际大都市新上海外滩旅游景观的重要组成部分, 具有城市道路、历史和景观三位一体的功能和重要地位, 确保其使用安全具有十分重要的意义。

锈蚀与疲劳是控制外白渡桥剩余寿命的两大因素。该桥过去曾进行了几次大修, 但都是针对锈蚀问题和桥面系而进行的。有关疲劳问题在当时该桥的设计中没有加以考虑, 现在市政管理部门要采取措施来保障它的使用, 因此迫切需要评估它的剩余寿命和使用安全。本文在对桥梁档案进行详细调查基础上, 初步建立了外白渡桥工作模型, 进而与 1991 年、2000

年的实测结果进行对比来校正工作模型, 最终建立了反映实际受力性能的三维力学模型。在实桥工作状态模拟的基础上, 联合应用传统疲劳分析和工程断裂力学计算该桥剩余寿命, 并给出确保外白渡桥使用安全的检测间隔和维修策略。

1 工作状态模拟

1.1 3D FEM 计算模型的建立

外白渡桥已服务了近百年来, 原始设计资料大部分已丢失。历史上做过多次大修, 但修复资料不齐全, 尽管我们对档案资料做了深入研究和恢复工作, 但据此仍难以建立符合实际的工作模型。即使该桥的设计

计算模型已知，但竣工后的实际桥梁结构已发生变化。例如在设计时，纵横梁与混凝土桥面板之间的相互作用可能就不会考虑。另外，外白渡桥经过近百年运营，在车辆荷载和其它不利因素的作用下，结构目前的实际状态与刚竣工时的状态又有所不同，比如意外荷载的作用会使结构的构件破损，或使整体结构及构件发生变形，长期的风化锈蚀会削弱部分构件的断面，长期车辆动荷载作用下会造成构件的疲劳损伤累积，空间的连接粘合作用也会随桥梁的振动而逐步退化减弱。桥梁的实际状态是随时间变化的（见图 1），它与理论设计模型有所差别，如何来确定这种随时间变化的实际工作状态模型是既有桥梁使用安全评估中应首先解决的问题。图 2 给出了确定这种差别、建立结构实际工作模型的基本过程。

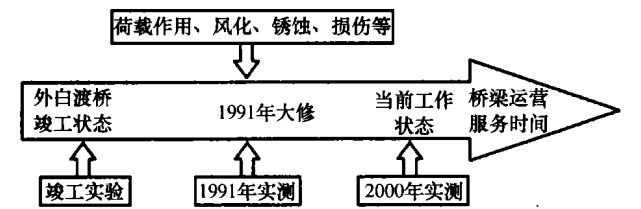


图 1 模型识别过程

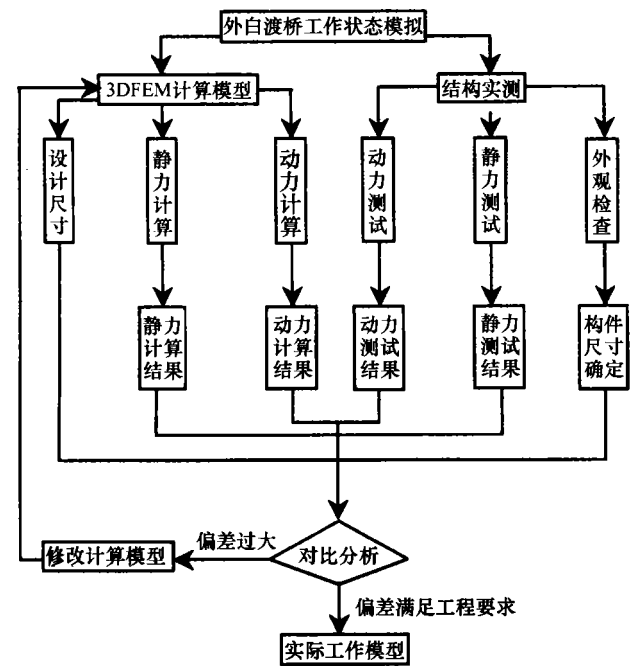


图 2 工作模型建立流程

在对外白渡桥工作模型进行识别过程中，首先查看原始设计图纸、历次大修图纸以及 1991 年加固图纸和实测资料，并进行实地勘测对照，以此为依据确定外白渡桥构件尺寸、节点加强板、风撑、斜腹杆修补情况，初步建立外白渡桥工作模型。为得到更精确、合理的力学分析模型，2000 年又对外白渡桥进

行实桥静动力测试，从而获得该桥最新的应力、位移和自振频率，并与已建力学模型的计算结果进行对比分析来修正力学模型，最终可建立与外白渡桥当前工作状态相吻合的力学模型。三维力学模型（3D FEM）建立过程中关键是桥面系混凝土与钢纵、横梁的共同工作的模拟，经过多次试算得到了准确的三维力学模型，如图 3 所示。

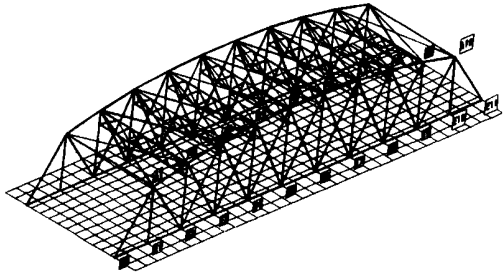


图 3 外白渡桥工作（计算）模型

1.2 计算对比

1.2.1 与 1991 年静载试验结果对比

根据上海铁路局桥梁检定队提供的 1991 年上海市外白渡桥结构试验报告^[1]，试验采用 1 500kN Scheuele 大平板车进行 8 个工况的静力加载。表 1 给出了各工况重要杆件内力计算值与实测值，相对误差一般在 10% 之内，计算与实测吻合较好。工况 1 实测跨中下弦挠度 9.8mm 与计算值 10.3mm 的相对误差为 4.9%。

1991 年实测杆件轴力与计算值对比（单位 kN）				表 1
工况号	杆号	计算值	实测值	
1	E3A4	-180.5	-184.2	
	E5E6	352.5	365.9	
	A5A6	-1163.0	-1246.4	
2	A4A5	-1131.0	-1185.4	
3	E3A4	112.8	115.6	
4	E4A3	258.2	279.7	
5	E4A3	-97.3	-92.7	
6	E2A2	-199.6	-229.5	
7	E1A1	251.5	250.3	
8	E1A1	270.7	256.1	

1.2.2 与 2000 年静载试验结果对比

为进一步验证计算模型的正确性，又将模型计算值与 2000 年检测结果^[2]进行对比分析。2000 年选取 3 × 300kN 汽车进行 5 种工况静载试验。如表 2 所示，各工况轴力计算值一般比实测值大，受力较大杆的相对误差较小，仅当杆件轴力较小时误差稍大。工况 5 跨中下弦挠度计算值 5.34mm 与实测值 5.2mm 的相对误差为 5%。

2000 年实测杆件轴力与计算值对比（单位 kN） 表 2

工况		E5-E6	A5-A6	A1-E1	A1-E2	A2-E3	A5-E6	A6-E5
1	计算	30.1	-138.6	216.8	59.0	-58.3	-27.6	26.6
	实测	28.9	-112.2	199.1	51.4	-63.1	-23.4	18.0
2	计算	60.7	-255.1	49.7	259.7	-1.4	-52.0	49.2
	实测	67.7	-237.5	42.2	244.0	1.7	-45.1	38.9
3	计算	182.1	-590.6	-5.7	218.2	124.6	-27.4	85.1
	实测	176.6	-581.0	-7.8	178.2	119.5	-28.7	66.8
4	计算	183.5	-602.6	5.3	208.0	118.3	4.4	60.5
	实测	177.4	-556.5	5.0	190.5	114.5	-4.7	48.6
5	计算	171.0	-565.0	-4.3	171.5	96.6	106.5	-61.7
	实测	143.6	-529.3	-6.9	129.5	88.9	78.0	-45.8

1.2.3 动力特性

采用 ALGOR 动力模块进行模态分析，动力分析表明：竖弯振型计算频率 3.42Hz 与 2000 年实测值相同，但对称横弯振型计算频率 2.6Hz 比 2000 年实测值 2.93Hz 略小；竖弯和横弯振型计算频率与 1991 年实测值 3.81Hz 和 3.2Hz 相比都略小，其原因可能是 1991 年大修时割换桥门架、拆换人行道及边纵梁、桥面重新铺装等导致结构连接、质量、刚度的变化所致。

由以上对比分析可知，工作模型的静、动力特性与实测结果较吻合，计算模型是正确的，为外白渡桥剩余寿命计算与使用安全评估奠定了基础。

2 基于疲劳损伤的使用寿命估算

在精确模拟外白渡桥工作状态基础上，项目研究中^[3]通过对文献资料^[4,5]所提供的各种足尺疲劳试验结果的调查分析，偏安全采用美国 AASHTO 规范的 $S-N$ 曲线，其中 $m=3$ ，疲劳细节分级为 71MPa，变幅疲劳极限强度（门槛值）为 17.9 MPa。按 Miner 线性累积损伤原理来计算损伤累积。各主要杆件疲劳使用寿命估算结果如表 3 所示。通过损伤累积分析获得使用系数 γ ，其值愈小表明已有损伤累积愈大，关注的优先级愈高，进而排列出各杆的检测优先级，其中 E1A1 杆最高。

3 基于断裂力学的剩余寿命与安全分析

由于外白渡桥地处外滩，交通得到限制，变化不大，因此本文采用当前交通情况，应用断裂力学方法模拟裂纹扩展^[6~8]来预测外白渡桥的剩余寿命。应用断裂力学计算老钢桥剩余寿命包括如下主要工作：交通荷载谱模拟、识别临界构件、断裂力学分析模型的建立、材料韧性、初始裂纹探测、临界裂纹大小的确定、剩余寿命计算等，这里不作详细介绍。应用断裂

各杆件疲劳损伤和使用寿命 表 3

杆号	使用寿命 (年)	N	$D /$ (年)	$\Delta\sigma_R$ (MPa)	$\Delta\sigma_e$ (MPa)	γ
E1A1	98	23592308	0.010241	31.2	30.7	1.016
E2A1	310	11674706	0.003226	39.4	26.4	1.492
E2A2	233	15715578	0.004294	35.7	26.3	1.357
E3A2	525	9088014	0.001904	42.9	24.1	1.780
E3A3	185	16625498	0.005401	35.1	27.9	1.258
E4A3	335	11845222	0.002988	39.2	25.6	1.531
E3A4	348	12015268	0.002875	39.1	25.2	1.552
E4A4	241	13796568	0.004151	37.3	27.2	1.371
E5A4	291	12911934	0.003434	38.1	26.1	1.460
E4A5	308	12864370	0.003248	38.2	25.6	1.492
E5A5	247	13432412	0.004046	37.6	27.2	1.382
E6A5	290	13143738	0.003448	37.9	25.9	1.463
E5A6	293	13096362	0.003411	38.0	25.9	1.467
E5E6	113597	78208	0.000009	209.2	19.0	11.011

注： N 为使用 94 年内的应力循环次数； D 为相对于每年的损伤度； σ_R 为使用 94 年损伤累积后的疲劳抗力； $\Delta\sigma_e$ 为等价应力幅， $\Delta\sigma_e = \sqrt[3]{\sum n_i \Delta\sigma_i^3 / \sum N_i}$ ； γ 为构件使用系数。

力学计算老钢桥剩余寿命，因无需知道桥梁的以往受载历史，从而使该法比疲劳方法更为可靠。表 4 列出了主要临界杆件在观测与超声探测情况下的计算剩余寿命，其中 E1A1 杆的计算剩余寿命最短。

剩余寿命及探测间隔 表 4

杆号	应力循环 次数/年	超声波探测			观测		
		应力总 循环	剩余 寿命 (年)	探测 间隔 (年)	应力总 循环	剩余 寿命 (年)	探测 间隔 (年)
A1E1	7.99E+06	6.35E+07	7.95	3.98	1.43E+07	1.79	1.19
A1E2	8.69E+06	3.16E+08	36.34	18.17	9.65E+07	11.11	7.41
A2E2	8.71E+06	2.82E+08	32.41	16.21	9.74E+07	11.18	7.45
A2E3	8.44E+06	3.15E+08	37.36	18.68	9.71E+07	11.51	7.67
A3E3	8.64E+06	1.39E+08	16.11	8.06	5.01E+07	5.79	3.86
A3E4	6.89E+06	1.93E+08	27.93	13.97	5.33E+07	7.73	5.15
A4E3	4.84E+06	1.14E+08	23.53	11.77	3.41E+07	7.04	4.69
A4E4	7.95E+06	1.78E+08	22.45	11.23	4.58E+07	5.76	3.84
A4E5	6.08E+06	1.10E+08	18.04	9.02	2.55E+07	4.20	2.80
A5E4	4.32E+07	2.19E+09	50.72	25.36	3.81E+08	8.82	5.88
A5E5	7.77E+06	1.49E+08	19.15	9.57	4.68E+07	6.03	4.02
A5E6	5.79E+06	1.21E+08	20.87	10.44	3.25E+07	5.62	3.75
A6E5	4.01E+06	8.63E+07	21.53	10.77	2.29E+07	5.71	3.81
E5E6	9.15E+06	4.89E+09	534.14	267.07	2.01E+09	219.45	146.30

4 检测间隔及维护对策

对于观测方法，应考虑 1.5 的安全系数，得到最大检测间隔年数；对于超声波探测方法，考虑存在一次漏检的可能性，因此安全系数应取（下转第 57 页）

信号最大值的线性变换, 利用希尔伯特变换, 可以将检测相关函数峰值的运算转变为相应的过零检测。这样有利于在相关峰平坦的条件下得到更好的时延估计, 因此本文中用希尔伯特变换时延估计的波速精度高于互相关自动延时估计算法估计的波速的精度。

3 结论

本文介绍了希尔伯特变换时间延迟估计法的基本原理, 研究了它的实现算法, 编制了相应的计算程序, 并将该算法应用于双传感器测速计算, 获得了比较满意的结果。它的波速估计精度远远高于用肉眼观察所得的波速精度, 并且其波速估计精度还高于互相关自动延时估计算法估计的波速的精度。在实验中, 我们发现, 进行时延估计时, 在确定两触发点的大致位置后, 将后面的信号全部置零, 这样可以避免后面的反射波信号对时延估计的干扰。在时延估计前, 对所有信号进行这样的预处理, 可以得到满意的结果。研究结果表明希尔伯特变换法用于应力波信号通过混凝土结构这种复杂的非均匀介质传递系统的时间延迟估计是可行的。它是混凝土结构特性参数及缺陷自动识别中所必不可少的技术, 很有必要对其进行进一步的深入研究, 而且, 这一技术还可以延伸到钢结构、

复合材料的无损检测中加以运用。

参考文献:

[1] Achenbach J D. Wave Propagation in Elastic Solids [M] . Amsterdam: North-Holland Press, 1973: 310—318.
[2] Andersen J, Nerenst P. Wave Velocity in Concrete [J] . Journal of the American Concrete Institute, 1952, 23 (5): 613—635
[3] Wu T T, Fang J S. A New Method for Measuring in Situ Concrete Elastic Constants Using Horizontally Polarized Conical Transducers [J] . Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101 (3): 330—336.
[4] Pratt D, Sansalone M J. Impact-echo Signal Interpretation Using Artificial Intelligence [J] . ACI Materials Journal, 1992, 89 (2): 178—187.
[5] Lin Y, Sansalone M J. Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-echo Method [J] . ACI Materials Journal, 1992, 89 (4): 394—405.
[6] Sansalone M J, Streett W B. Impact-echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry [M] . Ithaca, N. Y: Bullbrier press, 1997: 67—74
[7] 王宏禹, 邱天爽. 自适应噪声抵消与时间延迟估计 [M] . 大连: 大连理工大学出版社, 1999: 170—202
[8] 贝达特 J S, 皮尔索 A G, 著, 凌福根, 译. 相关分析和谱分析的工程应用 [M] . 北京: 国防工业出版社, 1983: 41—74

(上接第 53 页) 2.0。从表 4 中的计算结果来看, 采用观测方法必须每年进行, 采用超声波探测的方法必须每 3 年进行一次。这样的探测安排间隔较短, 在具体实施中会有困难。因此, 建议对超声波探测间隔小于 10 年的杆件进行加强。这时对应的观测间隔也将提高到 4 年, 这与钢桁梁拷铲油漆的间隔相当, 能够保证下一检测的质量。

5 结论

在对桥梁档案进行详细调查基础上, 初步建立了外白渡桥工作模型, 进而与实测静、动力结果进行对比来校正工作模型, 最终建立了反映实际受力性能的三维力学模型。在实桥工作状态模拟的基础上, 联合应用传统疲劳分析和工程断裂力学计算该桥剩余寿命, 并给出确保外白渡桥使用安全的检测间隔和维修策略。本文介绍的老钢桥剩余寿命与使用安全评估方法是确定性的, 在进一步的研究中将引入概率断裂力

学和可靠度理论来评估老钢桥的使用安全性。

参考文献:

[1] 上海铁路局桥梁检定队. 上海市外白渡桥结构试验报告 [R] . 1991.
[2] 上海铁路局桥梁检定队. 上海市外白渡桥荷载试验报告 [R] . 2000.
[3] 陈惟珍, 等. 上海市外白渡桥剩余寿命及使用安全性研究 [R] . 2001.
[4] Bruhwiler E, Smith, I F C, Hirt M A. Fracture and Fatigue of Riveted Bridge Members [J] . J. Struct. Engng., ASCE, 1990, 116 (1): 198—214
[5] Kulak G L. Fatigue Strength of Riveted Connection [J] . Stahlbau, 1996, 65 (11): 445—451.
[6] 陈惟珍, Albrecht G. 应用断裂力学方法计算老钢桥剩余寿命 [J] . 华东公路, 2000, No 4: 43—46.
[7] Hensen W. Grundlagen fuer die Beurteilung der Weiterwendung alter Stahlbruecken [D] . Dissertation, RWTH Aachen, 1992
[8] Stoetzel G. Verfahren zur Beurteilung der Sicherheit bei Weiterwendung alter Stahlbruecken [D] . Dissertation, RWTH Aachen, 1998