

高路堤下涵洞垂直土压力研究

郑俊杰, 赵建斌, 陈保国

(华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 依托十漫高速公路高填方涵洞工程, 结合现场测试结果, 采用理论分析和数值模拟的方法研究了高填方涵洞垂直土压力分布特征和变化规律, 并对顾安全垂直土压力理论计算公式进行了修正, 得出与现场实测结果更为接近的高路堤下涵洞垂直土压力计算方法。研究表明: 高填方涵洞涵顶存在垂直土压力集中现象, 土压力集中系数随填土高度的增加逐渐增大, 当路堤填土达到一定高度后逐渐趋于稳定并略有减小。

关键词: 高填方; 涵洞; 垂直土压力; 集中系数

中图分类号: TU432; U449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1009-05

作者简介: 郑俊杰(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与隧道工程的科研和教学工作。E-mail: zhengjj@hust.edu.cn。

Vertical earth pressure on culverts under high embankments

ZHENG Jun-jie, ZHAO Jian-bin, CHEN Bao-guo

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the project of the culverts under high embankments in the expressway from Shiyan to Manchuanguan, the distribution characteristics and variation laws of the vertical earth pressure on culverts are studied by theoretical analysis, numerical simulation, as well as field tests. The formula for the vertical earth pressure proposed by GU An-quan is modified to get the values which are closer to those measured in the field tests. The results show that there is earth pressure concentration on the top of culverts under high embankments, and that the concentration coefficient increases with the height of the fill, but it approaches the limit value at a certain height of fill, then decreases slightly.

Key words: high embankment; culvert; vertical earth pressure; concentration coefficient

0 引言

现今我国高速公路建设发展迅速, 特别是在西部大开发后, 很多高速公路都修建于西部的山岭重丘区, 为满足高速公路线形要求, 高填方涵洞的应用越来越多。但由于我国的《公路桥涵设计通用规范》^[1]中的线性土压力计算理论未能全面反映高路堤下涵洞的受力机理, 使得很多高填方涵洞的设计荷载小于其实际受到的垂直土压力, 导致涵洞结构开裂、地基沉降过大, 有的甚至出现垮塌, 严重影响了高速公路的正常使用。

国内外对高路堤下涵洞的土压力计算均有一些研究成果。1913年, Marston等基于散体材料极限平衡条件推导得出了Marston公式^[2]; 耶梅里扬诺夫采用弹性力学微分方程推导得出了涵管土压力计算公式^[3]; Kim等应用有限元方法分析了深埋混凝土箱涵与填土的相互作用机理, 其中填土采用Duncan-Chang本构模型模拟, 得出了在不同埋设方式下以及土体和涵洞不同参数对涵—土相互作用的影响^[4]; 20世纪80

年代, Handy通过将土拱定义为小主应力轨迹, 用摩尔应力圆求解出侧向土压力系数^[5], 随后Kellogg将该理论应用到地下构筑物垂直土压力的推导计算中, 并认为地下构筑物的垂直土压力荷载更多地取决于填土边界条件, 而非填土的物理力学性质^[6]; Bennett等对前人已做的试验数据进行分析, 认为现行的美国交通规范(AASHTO)在涵顶土压力计算时会得到较小的土压力集中系数, 但由于涵洞在结构设计时采用了较大的结构安全系数, 因此依照该规范设计的涵洞还是足够安全的^[7]。在国内, 曾国熙教授对Marston公式进行了修正, 在公式中考虑了填土黏聚力对涵顶土压力的影响^[8]; 杨锡武将模型试验数据回归分析, 得出高填方涵洞的非线性土压力计算公式^[9]; 顾安全以刚性地基为基本情况, 类似于条形基础沉降计算的弹性半空间无限体假设, 推得涵顶土压力计算的顾安全公

基金项目: 湖北省科技厅科技攻关项目(鄂交科技(2005)361号)

收稿日期: 2008-05-05

式^[10]。以上这些涵顶土压力计算方法的假设条件以及计算模型各不相同,导致相同条件下不同土压力计算方法得出的涵顶土压力值差别也较大。我国目前最新的《公路涵洞设计细则》^[11]开始采用与《铁路桥涵设计基本规范》^[12]相同的经验系数法计算作用于涵顶的垂直土压力,该方法虽然使用简单,但理论依据不足,未能考虑边界条件、涵洞以及填土类型对涵顶土压力的影响。本文依托西部大开发省际高速公路银(川)武(汉)线湖北十(堰)至漫(川关)段高速公路高填方涵洞工程,结合现场测试、理论分析以及数值模拟,研究了高填方涵洞垂直土压力分布特征和变化规律,并对顾安全垂直土压力理论计算公式进行了修正。

1 理论分析

1.1 顾安全涵管土压力理论

20 世纪 60 年代初,顾安全教授对上埋式管道垂直土压力的影响因素作了分析,他认为由于涵洞与周围填土存在刚度差异,导致管顶平面内外土柱体之间产生沉降差,并造成涵管顶部的垂直土压力集中。顾安全教授假定涵顶填土中的应力分布与弹性半空间无限体内的应力分布相当,将涵顶填土假设为弹性半空间无限体,将涵顶看成条形基础,以附加垂直土压力反作用于填土上,通过沉降差 δ 的弹性理论解反算涵顶附加土压力 $\Delta\sigma$,如图 1 所示,并得到涵顶垂直土压力计算公式:

$$\sigma_v = \gamma H \left[1 + \frac{(1+h/2H)hE}{\omega_c B(1-\mu^2)E_h} \eta \right], \quad (1)$$

式中, h 为涵洞凸出地面高度, E 为涵顶以上填土的变形模量, E_h 为与涵洞同高度的两侧填土的变形模量, μ 为涵顶填土的泊松比, ω 为与刚性涵洞的长宽比 L/B_1 有关的系数,可查表得到, η 为涵洞截面(包括基础)的外形影响系数, $\eta = B_1/B$, B_1 为截面换算宽度,按地面以上的涵洞横截面面积 A 与涵洞凸出地面高度 h 之比确定,即 $B_1 = A/h$ ^[10, 13], B 为基础宽度。

由弹性力学理论推导得出的刚性基础沉降计算公式

$$\delta = \frac{\Delta\sigma\omega B(1-\mu^2)}{E}, \quad (2)$$

式(2)也是顾安全公式的出发点,在地基沉降计算时,利用式(2)可求出基底沉降 δ 。在顾安全公式中则是利用涵顶平面内外土柱体之间的沉降差 δ 来计算涵顶附加应力 $\Delta\sigma$,

$$\delta = \frac{\gamma(h/2+H)h}{E_h}. \quad (3)$$

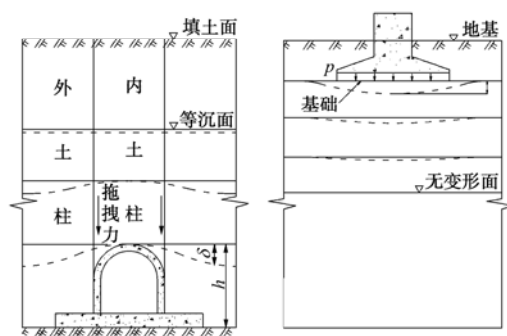


图1 涵顶填土与条形基础下地基变形对比示意图

Fig. 1 Comparison of deformation between fills on culvert and

ground beneath strip footing

1.2 顾安全公式的修正

由于涵顶内外土柱体之间的摩擦作用将外土柱体部分填土荷载转移到内土柱体上,从而导致涵顶产生土压力集中,而涵洞台背土体受到的垂直土压力小于其上填土荷载 γH ,如果仍用土柱体自重荷载计算涵洞台背内土体的沉降,则会得到偏大的差异沉降,使得涵顶土压力的计算结果大于实际值,因此本文建议用以下方法计算涵顶垂直土压力。

涵顶受到的垂直土压力与其外侧涵洞台背填土受到的土压力之差为

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma_s, \quad (4)$$

式中, σ_s 为涵顶平面处涵洞台背填土上的垂直土压力,即外土柱体的垂直压力, σ_c 为作用于涵顶的垂直土压力。

根据涵顶平面竖向力的平衡条件 $\Sigma V = 0$ 可得:

$$\gamma H(D+2r) = D\sigma_c + 2r\sigma_s, \quad (5)$$

式中, D 为涵洞宽度, r 为涵洞对其周围路堤填土的影响范围, r 可按弹性力学公式中条形荷载作用下半空间体沉陷公式近似求得^[14]。沉陷计算公式为

$$\left. \begin{aligned} w(x) &= \frac{1}{\pi E} (F_{ki} + C), \\ F_{ki} &= -2 \frac{x}{D} \ln \left(\frac{2x/D+1}{2x/D-1} \right) - \ln \left(\frac{4x^2}{D^2} - 1 \right), \\ C &= 2 \left(\ln \frac{r}{D} + 1 + \ln 2 \right), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, $w(x)$ 为条形荷载边缘处沉陷的分布函数, D 为条形荷载的作用宽度, x 为沉陷计算点至条形荷载中心的距离。理论上讲, r 的取值为无穷大,但是对于理想的弹性体,距离条形荷载边缘 $1.5D$ 的范围外,其沉陷与条形荷载中心处沉陷的比值只有 13.8%。事实上,土体并非理想弹性体,因此本文中涵洞对其周围填土沉陷的影响范围取 $1.0 \sim 1.5D$ 便可满足计算精度要求,计算模型见图 2。忽略涵洞结构本身的压缩变形,则内外土柱体之间的沉降差 δ 为

$$\delta = \frac{\sigma_s}{E_h} h \quad (7)$$

联立求解式 (2)、(4)、(5) 和 (7) 可得作用于涵顶的填土垂直土压力为

$$\sigma_c = \gamma H + \frac{r\gamma h E (2H + h)\eta}{D[\omega(1 - \mu^2)(D + 2r)E_h + Eh]} \quad (8)$$

涵顶平面处, 涵洞台背填土受到的垂直土压力为

$$\sigma_s = \gamma H - \frac{\gamma h E (2H + h)\eta}{2[\omega(1 - \mu^2)(D + 2r)E_h + Eh]} \quad (9)$$

涵顶平面垂直土压力差值为

$$\Delta\sigma = \frac{\gamma h E (2H + h)(D + 2r)\eta}{2D[\omega(1 - \mu^2)(D + 2r)E_h + Eh]} \quad (10)$$

式中, 涵洞两侧填土变形模量 E_h 是随填土高度变化的, 仍沿用顾安全公式中 E_h 的确定方法, 即先由试验测得不同压力下土体的压缩模量, 再换算得到不同填土高度下土体的变形模量^[10]。为了与顾安全公式进行比较, 本文算例中 E_h 的取值与文献[10]中的值相同, r 取 1.5*D*。

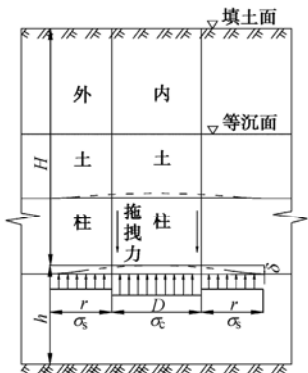


图 2 计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation

2 现场原位试验测试结果

2.1 测点布设

现场选取十漫高速公路桩号为 K76+687 处高填方混凝土拱涵进行原位试验, 该拱涵高 $h=7.5\text{ m}$, 宽 $D=7.5\text{ m}$, 总长 104.465 m, 共分为 17 个节段, 其中从 #6 节段处填土高度达到最大值 18 m, 基底平面沟谷宽度 $B=72\text{ m}$, 涵洞左侧距离岸坡 $L_L=15\sim35\text{ m}$, 坡角 $65^\circ\sim75^\circ$, 涵洞右侧距离岸坡 $L_R=30\sim50\text{ m}$, 坡角 $60^\circ\sim65^\circ$ 。

本次现场测试, 为了反映涵洞垂直土压力随填土荷载的变化规律及涵顶的土压力集中现象, 在 #6、#7 节段涵洞顶部共埋设了 26 个土压力盒, 其中涵顶平面埋设 14 个, 涵顶正上方埋设 2 个。涵洞 #6、#7 节段填土高度相同, 但距边坡距离不同, 涵洞 #6 节段沟谷宽

度小些。高填方涵洞尺寸及土压力盒布置如图 3 所示。

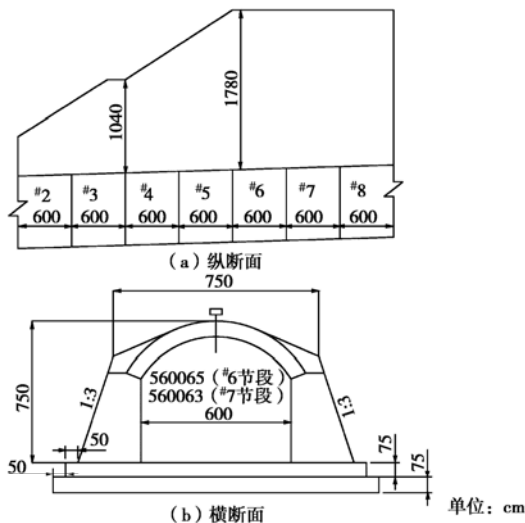


图 3 土压力盒布置图

Fig. 3 Layout of soil pressure cells

2.2 实测结果分析

图 4、5 分别为垂直土压力以及土压力集中系数随填土高度的变化曲线。从图 5 中可以看出, 在涵顶出现了土压力集中现象, 土压力集中系数大于 1。由于涵洞与两侧填土存在刚度差异导致了内外土柱体之间产生沉降差, 并通过摩阻力作用使外土柱体的自重荷载部分传递到了内土柱体上。但涵顶的土压力集中系数并不是随填土高度的增加无限增长的, 当涵顶填土达到一定高度后, 涵洞台背内土体逐渐被压实, 变形模量逐渐增大, 内外土柱体之间的沉降差增幅渐小, 使得涵顶土压力集中系数趋于稳定并有减小趋势。同时由于涵洞 #6 节段沟谷宽度小, 边坡起到一定的减载作用, 因此 #6 节段的土压力集中系数要小于 #7 节段。

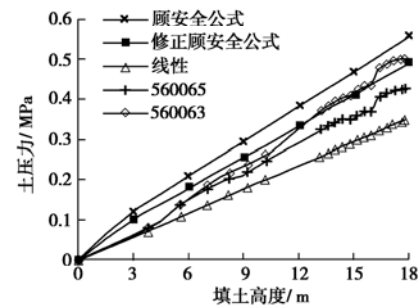


图 4 涵顶垂直土压力与填土高度关系

Fig. 4 Relationship between vertical earth pressures on top of culvert and height of fills

从图 5 中还可以看出, 在涵顶填土较高时, 本文提出的对顾安全公式的修正与涵洞的实际受力情况更接近。但由于在公式推导过程中仍然采用顾安全的计算模型, 即采用条形荷载作用下半空间无限弹性体的沉降计算公式来反推涵顶土层的附加压力, 因此只有

半空间无限体接近, 并且填土越高, 计算结果越接近实测值; 而在填土高度较低时, 土压力集中系数出现峰值, 与现场实测结果存在偏差。

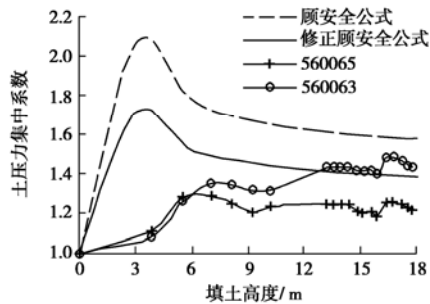


图 5 涵顶垂直土压力集中系数与填土高度的关系

Fig. 5 Relationship between concentration coefficients of vertical earth pressure on top of culvert and height of fills

3 数值模拟

本文应用有限元软件 ANSYS 模拟高填方涵顶垂直土压力随填土高度的变化规律, 采用平面四边形单元建模, 涵洞为混凝土拱涵, 高 7.5 m, 宽 7.5 m, 涵洞左侧距离岸坡 $L_1 = 16$ m, 坡角 70° , 涵洞右侧距离岸坡 $L_2 = 21$ m, 坡角 65° 。在分析中将涵洞洞身简化为线弹性材料, 土体材料采用 Drucker-Prager 模型, 参数由现场试验确定, 并且在建模时考虑涵洞与填土之间的接触问题, 有限元网络如图 6 所示。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

介质	E /MPa	μ	γ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /($^\circ$)
路堤填土	30	0.27	2000	0	20
涵洞洞身	30000	0.15	2200	—	—
涵洞地基	50	0.25	2000	2.5	30
边坡	3000	0.20	2100	0	35

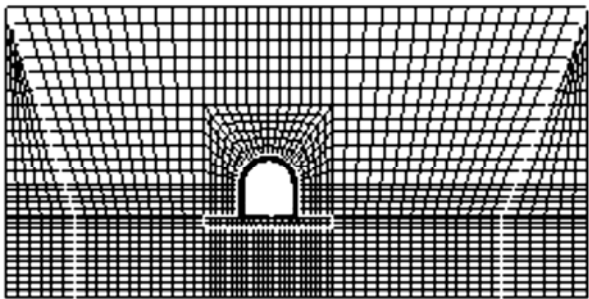


图 6 计算模型网格划分

Fig. 6 Model mesh

图 7 为填土高度 18 m 时的填土沉降等值线, 由于涵洞洞身与填土的刚度差异, 涵洞两侧土体的沉降要明显大于涵洞顶部土体的沉降, 导致涵洞顶部受到的垂直土压力集中, 并且在涵洞轴线处达到最大值(图

同导致了涵洞两侧土层沉降不均匀, 导致涵洞产生偏载效应, 反映出岸坡对涵洞受力状态的影响。

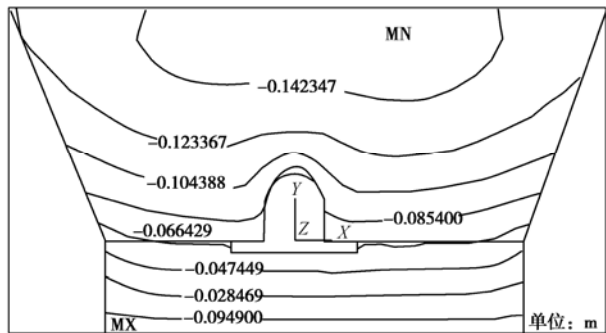


图 7 填土沉降等值线

Fig. 7 Settlement contour of fills

图 9 反映了涵顶垂直土压力随填土高度的变化规律, 从图 9 曲线的变化趋势可以看出, 在填土高度较低时, 涵顶土压力集中系数随填土高度的增加逐渐增大。由于涵洞台背土体受到的垂直荷载不断增大, 土体逐渐被压实, 压缩模量增大, 使得涵顶平面内外土柱体之间的沉降差不再继续增大, 涵洞顶部土压力集中系数逐渐趋于稳定并略有减小。数值模拟结果与现场实测数据较为符合, 并且在填土较高的情况下与文中提出的修正的顾安全计算方法得到的计算结果也基本符合。

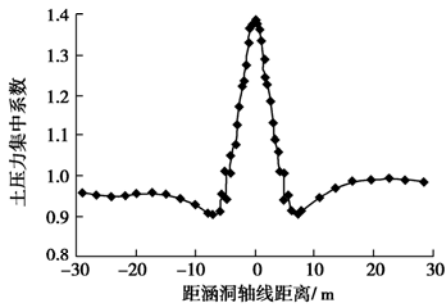


图 8 涵顶土层土压力集中系数

Fig. 8 Concentration coefficient of vertical earth pressure on top of culvert

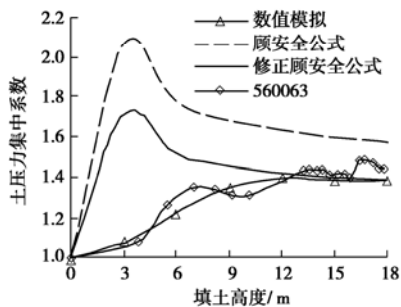


图 9 涵顶垂直土压力集中系数与填土高度的关系

Fig. 9 Relationship between concentration coefficient of vertical earth pressure on top of culvert and height of fills

4 结 论

(1) 由于涵洞与其周围填土存在刚度差异, 导致涵顶出现土压力集中, 涵顶土压力随填土高度增加非线性增长, 土压力集中系数也逐渐增大, 当涵顶填土达到一定高度后, 土压力集中系数逐渐趋于稳定并略有减小。

(2) 本文对顾安全公式进行了修正, 考虑了涵洞台背填土的实际受力状态, 得到的土压力计算结果更接近现场实测数据, 可为涵洞结构的设计提供参考。

但该公式中仍然存在一些不足, 如在公式推导过程中将填土视为线弹性体, 忽略了填土的黏聚力、内摩擦角对涵顶土压力的影响; 在填土高度较低时该公式得到的计算结果较为保守等, 这些问题还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTG D60—2004 General specifications for design of highway bridge and culvert[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[R]. City of Ames: Iowa Engineering Experiment Station, 1913.
- [3] 车宏亚. 涵洞和水管设计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1958. (CHE Hong-ya. Design of culvert and pipe[M]. Beijing: China Water Power Press, 1958. (in Chinese))
- [4] KIM K, YOO C H. Design loading on deeply buried box culverts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(1): 20 - 27.
- [5] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 318.
- [6] KELLOGG C G. Vertical earth loads on buried engineered works[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **119**(3): 487 - 506.
- [7] BENNETT R M, WOOD S M, DRUMM E C, et al. Vertical loads on concrete box culverts under high embankments[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, **10**(6): 643 - 649.
- [8] 曾国熙. 土坝下管道竖向土压力的计算[J]. 浙江大学学报, 1960, **4**(1): 79 - 97. (ZENG Guo-xi. On the vertical pressure on the pipe line under an earth dam[J]. Journal of Zhejiang University, 1960, **4**(1): 79 - 97. (in Chinese))
- [9] 杨锡武, 张永兴. 山区公路高填方涵洞的成拱效应及土压力计算理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(21): 3887 - 2893. (YANG Xi-wu, ZHANG Yong-xing. Study on arch action and earth pressure theory for culverts under high embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(21): 3887 - 2893. (in Chinese))
- [10] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报, 1981, **3**(1): 3 - 15. (GU An-quan. Investigation of the vertical earth pressure on projecting conduit and underground chamber under a high embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, **3**(1): 3 - 15. (in Chinese))
- [11] JTG/T D65—04—2007 公路涵洞设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (JTG/T D65—04—2007 Guidelines for design of highway culvert[S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [12] TB 10002.1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. (TB 10002.1—2005 Fundamental code for design of railway bridge and culvert[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [13] 顾安全, 郭婷婷, 王兴平. 高填土涵洞(管)采用 EPS 板减荷的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 500 - 504. (GU An-quan, GUO Ting-ting, WANG Xing-ping. Experimental study on reducing-load measurement using EPS of culvert under high-stacked soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 500 - 504. (in Chinese))
- [14] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997. (XU Zhi-lun. Concise course of elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997. (in Chinese))