

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2016.03.013

桥梁工程系列课程教学方法研究

彭卫兵, 潘丽杰, 张勇, 卢成原

(浙江工业大学 建工学院, 浙江 杭州 310032)

摘要:为达到培养卓越土木工程师的目标,对桥梁工程系列课程提出“容错、启发、贯通”的教学方法,主要包括以下3个方面:首先,通过引导学生发现课本及规范中的错误,实现专业知识的容错;其次,启发学生建立工程热点问题与专业知识的有机联系,实现对专业知识的深入理解;最后,通过设计跨课程复合问题,进一步帮助学生融会贯通专业知识。

关键词:桥梁工程;土木工程师;教学方法

中图分类号:G642.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2016)03-0059-06

作为对我国现有工程教育模式的重大创新和突破,“卓越工程师教育培养计划”是要培养和造就一大批能适应和支撑产业发展,具有创新能力和国际竞争力的卓越工程师^[1]。卓越工程师培养,关键在于培养学生提出问题的勇气和解决问题能力^[2],如清华大学电路原理课程通过研究型教学,启发学生思考,引导学生发现问题,培养解决问题的能力^[3]。然而如何在土木工程专业课教学中培养上述能力,亟需进一步教学改革研究。

土木工程专业涉及规范众多,并且规范不断更新勘误,专业课教材中与之相关的内容,由于不能及时修改存在不同程度的错误。如果教师没有指出教材中的错误,将会导致学生概念混淆乃至认识错误。因此,在不断加强教师自身专业素质的前提下,鼓励学生发现课本或规范中存在的错误,不但可以消除其负面影响,而且还可以加深学生对课本知识的理解和认识,实现学生对专业知识的容错,培养学生发现问题的能力,进而启发学生积极思考,塑造学生批判性思维,并成为具有独立思考能力的个体。在容错和启发的基础上,学生对专业课程有了较为深刻的认识,此时教师可通过设计多门课程知识复合工程问题,进一步帮助学生融会贯通上述知识,从而提高教学质量,培养能满足社会发展需求的土木工程卓越工程师。

作为土木工程专业本科教学的核心主干课程,桥梁工程系列课程非常有必要进行相应教学方法研究和探索。针对我校本科生的认知特点,在桥梁工程系列课程中开展容错、启发、贯通的教学方法,在夯实基础的同时,强调发现问题和解决问题能力的培养。

一、容错

课本上的错误大致可以分为3类:一类是印刷错误,该类错误比较好识别,

收稿日期:2015-07-02

基金项目:浙江工业大学教改项目(JG1421,JG1420)

作者简介:彭卫兵(1978-),男,浙江工业大学建工学院教授,博士,主要从事桥梁抗倾覆研究,(E-mail)79899672@qq.com。

不易引起歧义,如混凝土最小保护层厚度从 20 mm 印刷成了 15 mm;第二类是概念错误,如“设计基准期”和“设计使用年限”两个概念混淆;第三类是计算方法错误,如桥梁工程中活载剪力计算。第二类错误和第三类错误比较难发现,会对学生学习造成不利影响。

在教学中可通过以下 3 种方法实现对课本及规范中模糊、错误和矛盾知识点的容错:首先,建议同门课程由多位教师主讲,定期讨论,并经常参加该课程的全国性学术会议,从而使授课教师对课本和规范中存在的错误有清晰的认识。其次,鼓励学生以批判的眼光,发现课本中存在的问题。最后,与实践相结合,实时检验课本及规范的准确性。笔者结合如下 3 个实例,具体说明如何在桥梁工程系列课程教学中实现容错。

(一)“设计基准期”和“设计使用年限”

关于结构可靠性的最新国家标准为 GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》,在“术语、符号”一章中,对“设计基准期”和“设计使用年限”给出了定义:“设计基准期”指为确定可变作用等的取值而选用的时间参数,“设计使用年限”指设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按预定目的使用的年限^[4]。结构的可靠性是指结构在规定时间内,在规定的条件下完成预定功能的能力,其中规定时间应该是“设计使用年限”。

然而目前,不少混凝土结构系列课程相关教材(尤其是公路桥梁专业)存在“设计基准期”和“设计使用年限”混淆的情况。例如,《结构设计原理》第 25 页指出,可靠度概念中的“规定时间”即“设计基准期”^[5]。《钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁结构设计原理》第 40 页指出,“规定时间”是分析结构可靠度时考虑各项基本变量与时间的关系所选用的设计基准期^[6]。事实上,依据给出的术语定义,“规定时间”应该是“设计使用年限”。之所以存在这种概念上的混淆,其根源在于 GB 50153—92《工程结构可靠性设计统一标准》的 1.0.5 条规定:“结构在规定的时间内,在规定的条件下,对完成其预定功能应具有足够的可靠度,可靠度一般可用概率度量。确定结构可靠度及其有关设计参数时,应结合结构使用期选定适当的设计基准期作为结构可靠度设计所依据的时间参数。”^[7]也就是说,在这个标准中,并没有明确“设计基准期”和“设计使用年限”这两个概念,而规定各个行业(如公路、铁路、水利等)的可靠

度设计统一标准均以此为依据制定,因此导致了目前桥梁工程系列课程相关教材中均认为“规定时间”是指“设计基准期”。

(二)单向板、双向板定义

目前 JTG D62—2004《公路桥涵及预应力混凝土结构设计规范》中把边长比等于 2 作为区分四边支承板是单向板还是双向板的界限值^[9],这个区分界限是由德国学者 Marcus H 提出,并根据十字交叉梁的简化模型进行分析确定^[10],如图 1 所示。然而上述理论存在如下问题。

(1)以十字交叉梁代替整块板,其计算模型是简化的,而实际荷载作用下,板受周边约束,使得其挠度和弯矩值比简化模型计算结果小。

(2)等效到十字交叉梁上的荷载并非均布荷载,靠近板带端部的荷载大,在中心处的荷载小。

(3)荷载沿板四周的传递与边界条件有关。

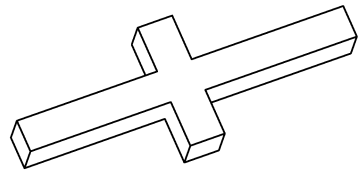


图 1 十字交叉板带简化计算模型

已有研究结果表明^[11]:长宽比为 3 时,沿短跨方向传递的荷载已达到 82% 以上,且不论固定边弯矩还是跨中弯矩均已趋近于稳定,已完全呈现出单向的受力性能,按单向板进行计算完全可行、可靠。GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中已把边长比等于 3 作为四边支承板区分单向板或双向板的界限^[12]。

(三)可变作用效应剪力计算

公路桥梁的可变作用主要包括汽车荷载和人群荷载等,可以通过求解荷载横向分布系数,然后运用工程力学的方法,具体计算主梁上的可变作用效应。汽车荷载作用效应的一般计算公式为

$$S_{\text{汽}} = (1 + \mu) \cdot \xi \cdot (m_1 P_k y_k + m_2 q_k \Omega) \quad (1)$$

式中: $S_{\text{汽}}$ 为所求截面弯矩或剪力; $(1 + \mu)$ 为汽车荷载冲击系数; ξ 为多车道桥涵汽车荷载横向折减系数; P_k 、 q_k 分别为车道集中荷载、均布荷载标准值; m_1 、 y_k 分别为 P_k 位置对应的荷载横向分布系数和内力影响线最大坐标值; m_2 、 y_k 分别为 q_k 影响线面积中心位置对应的荷载横向分布系数和影响线面积。

当计算支点截面处或靠近支点截面处的剪力

时,需考虑梁端区域内荷载横向分布系数变化所产生的影响,计算公式为

$$Q_{\text{汽}} = Q'_{\text{汽}} + \Delta Q_{\text{汽}} \quad (2)$$

式中: $Q'_{\text{汽}}$ 为由式(1)按不变的跨中截面荷载横向分布系数 m_c 计算的剪力值; $\Delta Q_{\text{汽}}$ 为考虑荷载横向分布系数变化而引起的剪力增(减)值。

对于 $\Delta Q_{\text{汽}}$, 目前的桥梁工程相关教材均按照图2(a)所示的力学计算模型和式(3)计算^[8]。

$$\Delta Q_{\text{汽}} = (1 + \mu) \cdot \xi \cdot \frac{a}{2} (m_0 - m_c) \cdot q_k \cdot \bar{y} \quad (3)$$

式中: a 为荷载横向分布系数 m 过渡段长度; \bar{y} 为 m 变化区段附加三角形荷载重心位置对应的内力影响线坐标值。

现课本中采用的支点剪力效应力学模型计算思路如下: 由于靠近右端支点处的内力影响线坐标值较小, 忽略了该侧支点附近荷载横向分布系数变化对内力的影响, 计算过程中需针对不同的 a , 插值求解 \bar{y} , 计算过程繁琐。

而实际上, 从图中可知, 两侧支点附近荷载横向分布系数变化区段的两个附加三角形荷载重心位置对应的内力影响线坐标值之和 ($\bar{y}_1 + \bar{y}_2$) 恒等于 1, 因此, 采用图 2(b) 的计算模型, 式(3)可简化为式(4), 计算不但简便, 结果也更为精确, 建议桥梁工程相关教材采用。

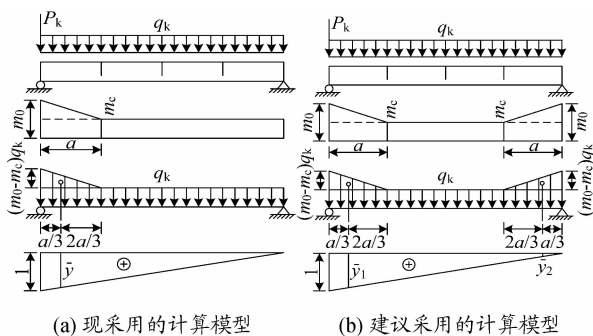


图2 两种支点剪力力学计算模型对比

$$\Delta Q_{\text{汽}} = (1 + \mu) \cdot \xi \cdot \frac{a}{2} (m_0 - m_c) \cdot q_k \cdot (\bar{y}_1 + \bar{y}_2) = (1 + \mu) \cdot \xi \cdot \frac{a}{2} (m_0 - m_c) \cdot q_k \quad (4)$$

人群荷载作用效应也可参照上述方法计算。

通过以上分析, 针对这类涉及多个规范的基本概念教学, 由于错误比较隐蔽, 需要为学生指明错误所在。对于计算方法的错误, 只有完全透彻理解该知识点, 才能做出正确的判断。

二、启发

随着工程问题的不断涌现, 常会出现很多看似熟悉, 但却很难通过课本和规范进行快速准确解释的概念。例如, 近年来由于超载导致多起桥梁倒塌事故, 超载亦成为媒体多次提到的热门词汇, 引起了包括土木工程专业学生及社会人士的关注。教师应结合课程实际情况, 启发学生关注超载的科学定义及判定方法, 为学生学习结构相关知识提供帮助。下面以 2 个实例说明如何启发学生思考。

(一) 汽车荷载超载判定

相关规范及教材中, 定义了车道荷载和车辆荷载, 分别用于桥梁结构的整体计算和局部计算, 并未明确汽车荷载超载定义。首先启发学生思考是不是作用在桥上的车辆荷载总重大于车道荷载的总重就是超载呢? 很快有学生发现不能通过上述方法判断超载。教师进一步启发学生思考, 提出了两个判定汽车荷载超载的基本原则: (1) 作用在桥梁整体结构上的汽车荷载效应大于车道荷载产生的荷载效应, 即在桥梁结构中, 汽车荷载产生的内力包络图(包括弯、拉、剪、扭各种内力)超出了车道荷载产生的内力包络图; (2) 作用在桥梁局部结构上(如桥面板、桥台和涵洞等)的汽车荷载效应大于标准车辆荷载产生的荷载效应。

根据上述两个原则, 以单车道简支梁桥为例, 判定汽车荷载超载的计算方法如图 3 和图 4 所示。

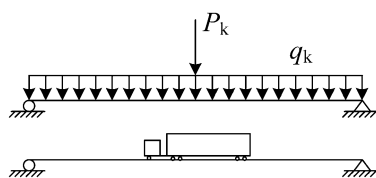


图3 超载判定基本原则(1)的计算示例

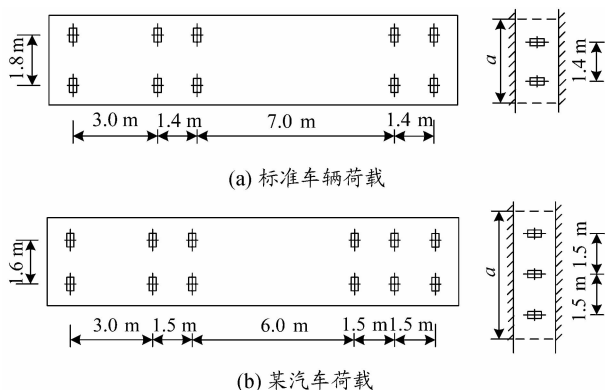


图4 超载判定基本原则(2)的计算示例

图 3 用于计算比较汽车荷载与车道荷载在简支梁桥中产生的跨中弯矩, 当车道荷载产生的跨中弯

矩效应小于汽车荷载产生的跨中弯矩效应时,则判定该汽车荷载超载。图4中,当标准车辆荷载在每米板宽上产生的弯矩或剪力效应小于相应汽车荷载产生的弯矩或剪力效应时,亦可判定为超载。

在教学中,通过对汽车荷载超载定义,促进了学生对车道荷载和车辆荷载等课程知识点的掌握。

(二) 根据塑性铰线判断单向板双向板

传统教材对单向板和双向板的定义局限在四边支承板或固结板,可以进一步启发学生思考,两边支承板或固结板,能否定义单向板和双向板。

针对以上问题,引导学生采用塑性铰线来判断是单向板还是双向板。在图5中,对于两边支承板或固结板,正塑性铰线只有一条,荷载只往一个方向传递,因此不论长宽比多少皆为单向板。同样,对于三边支承板或固结板,有没有单向板和双向板的区别呢?为什么?从图5中可以看出,对于三边、四边支承板或固结板,由于正塑性铰线有三条或五条,力没有往一个方向传递,可能是双向板。



图5 常见矩形板塑性铰线

带着上述疑问,进一步引导学生利用虚功原理来加深对单向板和双向板的认识。根据虚功原理,外力所做的功等于内力所做的功。设任一条塑性铰线的长度为 l ,单位长度塑性铰线承受弯矩为 m ,塑性铰线转角为 θ ,弯矩内功 U 可表示为

$$U = \sum l \cdot \vec{m} \cdot \vec{\theta} \quad (5)$$

对于图5中的三种支承板或固结板,建议采用较大面积区域产生塑性铰线时产生的弯矩内功与较小面积区域弯矩内功的比值,来判定该板为单向板还是双向板,从另一方面加深对知识的认识。

三、贯通

在容错和启发的基础上,学生对课程有了较为深刻的认识,此时,教师可通过设计多门课程知识的复合问题,进一步帮助学生融会贯通上述知识,从而提高教学质量。笔者从以下3个知识点说明如何帮助学生实现多门课程知识贯通。

(一) 荷载组合计算

GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》规定了基本组合、标准组合、频遇组合和准永久组合^[13],而JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》规定了三种荷载组合^[14],包括基本组合、短期效应组合和长期效应组合,其中《建筑结构荷载规范》中的频遇组

合和准永久组合分别对应《公路桥涵设计通用规范》短期组合和长期组合。在桥梁工程中,由于施工及预应力的作用,需要对构件进行应力计算,其实质上是构件的强度计算,是对构件承载力计算的补充。在《公路桥涵设计通用规范》设计规范中,应力计算采用何种荷载组合未做明确规定。

道路桥梁《结构设计原理》相关教材在论述应力验算例题时,未对标准组合中的人群荷载乘以相应的组合系数,如式(6)所示:

$$S = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n S_{Qik} \quad (6)$$

通过比较《建筑结构荷载规范》、《混凝土结构设计规范》和《公路桥涵及预应力混凝土结构设计规范》,实际上,应力计算宜采用标准组合

$$S = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \varphi_{ci} S_{Qik} \quad (7)$$

上述问题的解决是基于对跨课程相关规范的全面认识,因此要求学生所学知识融会贯通,否则很难发现类似错误。

(二) 预拱度设置

预拱度根据普通钢筋混凝土结构、部分和全预应力混凝土结构三者的受力特点不同而分别设置。

1. 普通钢筋混凝土结构

《公路桥涵及预应力混凝土结构设计规范》规定:当由作用(或荷载)短期效应组合并考虑作用长期效应影响产生的长期挠度不超过 $1/1600$ (l 为计算跨径)时,可不设预拱度,当不符合上述规定时则应设预拱度。钢筋混凝土受弯构件预拱度值按结构自重 $1/2$ 可变荷载频遇值计算的长期挠度值之和:

$$\Delta = w_G + \frac{1}{2}w_Q \quad (8)$$

2. 部分预应力混凝土结构

对于部分预应力混凝土结构,当由预加应力产生的长期上拱值大于按荷载短期效应组合计算的长期挠度时可不设预拱度;当预加应力产生的长期上拱值小于按荷载短期效应组合计算的长期挠度时应设预拱度,预拱度值按该项荷载的挠度值与预加应力长期上拱值之差:

$$\Delta_1 = \eta_{\theta, Ms} w_{Ms} - \eta_{\theta, pe} \delta_{pe} \quad (9)$$

3. 全预应力混凝土结构

对于全预应力混凝土结构有 $M_0/M_s > 1$,由 M_0 和 M_s 产生的竖向挠度之间存在如下关系:

$$\Delta_2 = w_{Ms} - \delta_{pe} < 0 \quad (10)$$

η_{θ, M_s} 是对于荷载短期效应组合计算挠度时考虑长期效应的增长系数, $\eta_{\theta, M_s} < 2.0$, 按照混凝土强度等级 C40—C80, 分别取 1.6 ~ 1.35, 中间混凝土按线性差值; $\eta_{\theta, \sigma_{pe}}$ 是预应力计算挠度时考虑长期效应的增长系数, $\eta_{\theta, \sigma_{pe}} = 2.0$ 。当为全预应力混凝土结构, $M_0/M_s > 1$, 则式(10)成立, 进一步式(9)中 $\Delta_1 < 0$, 故可得出, 在全预应力混凝土结构中可不设预拱度。

(三) 应力计算

对于预应力混凝土构件,《混凝土结构设计规范》(以下简称《砼规》)和《公路桥涵及预应力混凝土结构设计规范》(以下简称《桥规》)均要求进行施工阶段和使用阶段应力计算, 应力计算是对承载能力极限状态计算的补充。目前各教材上应力计算公式五花八门, 经常使学生在学习时产生混淆。

1. 采用何种荷载组合计算挠度

在《砼规》2010 中, 明确指出对于普通钢筋混凝土结构, 采用荷载的准永久值组合计算挠度, 而对于预应力混凝土结构则采用频遇值计算。在《桥规》中, 无论是预应力混凝土结构还是普通钢筋混凝土结构均采用荷载的短期组合, 即频遇值组合。

由于两种规范计算方法有矛盾, 因此, 在教学中需要引导学生查阅更多的文献, 了解该规范条文在不同行业应用的来龙去脉, 在此基础上, 比较上述计算方法的优缺点。

2. 预应力钢筋应力 (σ_{pe} , σ_{p0})

第 1 个问题: 当预应力钢筋应力为 σ_{pe} 时, 为什么需要加一个力使其重心处混凝土应力恢复为零? 这个问题需要联系材料力学中的相关内容才能得到解释。具体而言, 只有当截面应力恢复到零后, 在多个力的作用下, 才可以使叠加原理。

第 2 个问题: 为什么 σ_{pe} 和 σ_{p0} 对混凝土作用相互抵消, 但二者大小不等, 方向相反? 因为弹性压缩产生的预应力损失是可恢复的。

第 3 个问题: 弹性压缩的预应力损失的定义和计算。在《砼规》中, 混凝土弹性压缩引起的预应力损失不包括在 σ_1 中, 而在《桥规》中, 混凝土弹性压缩引起的预应力损失为 σ_{14} , 包括在整个预应力损失 σ_1 中。具体的 σ_{p0} 和 σ_{pe} 计算表达式如表 1 所示。

表 1 《砼规》和《桥规》中 σ_{pe} 和 σ_{p0} 计算表达式

	σ_{pe}	σ_{p0}
先张法—砼规	$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l - \alpha_E \sigma_{pe}$	$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l$
后张法—砼规	$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l$	$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pe}$
先张法—桥规	$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l$	$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \sigma_{14}$
后张法—桥规	$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l$	$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pe}$

上述计算公式中,《砼规》由于将混凝土弹性压缩排除在预应力损失 σ_1 之外, 概念清楚。而在《桥规》中, 由于混凝土弹性压缩引起的预应力损失为 σ_{14} , 对于先张法 σ_{14} , 即是 $\alpha_E \sigma_{pe}$, 因此 σ_{p0} 计算公式无异议。对于后张法, 当分批张拉时, σ_{14} 不为零, 因此, σ_{p0} 算出来的结果偏小, 建议将考虑 σ_{p0} 的计算公式调整为式(11), 从而和《砼规》一致。

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - (\sigma_l - \sigma_{14}) + \alpha_E \sigma_{pe} \quad (11)$$

3. 应力计算公式

在截面应力恢复到零的状态后, 在应力计算中, 偏心受压可以等效为轴心受压和受弯的叠加。在《砼规》中具体公式如表 2 所示,《桥规》中公式类似。

表 2 砼规中预应力混凝土应力计算公式

	σ_{pe}	N_p 或 N_{p0}
先张法	$\sigma_{pe} = \frac{N_{p0}}{A_0} \pm \frac{N_{p0} e_{p0}}{I_0} y_0$	$N_{p0} = \sigma_{p0} A_p + \sigma'_{p0} A'_p - \sigma_{15} A_s - \sigma'_{15} A'_s$
后张法	$\sigma_{pe} = \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n + \sigma_{p2}$	$N_p = \sigma_{pe} A_p + \sigma'_{pe} A'_p - \sigma_{15} A_s - \sigma'_{15} A'_s$

总之, 以实现卓越土木工程师培养为目标, 开展容错、启发、贯通的桥梁工程系列课程教学方法改革, 可以不断加深学生对土木工程专业知识的理解和认识, 帮助学生实现多学科知识的融会贯通。

参考文献:

- [1] 林健. 面向“卓越工程师”培养的课程体系和教学内容改革[J]. 高等工程教育研究, 2011(5): 1-9.
- [2] 邵辉, 龚方红, 徐萍, 等. 工程应用型创新人才教育培养活动的思考与实践[J]. 中国高等教育, 2010(9): 88-90.
- [3] 于歆杰, 陆文娟, 王树民. 专业基础课中的研究型教学[J]. 高等教育工程, 2006(1): 118-121.
- [4] GB 50153—2008 工程结构可靠性设计统一标准[S]. 2008.
- [5] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

- [6] 张树仁. 钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁结构设计原理 [M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [7] GB 50153—92 工程结构可靠性设计统一标准[S]. 1992.
- [8] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [9] JTG D62—2004 公路桥涵及预应力混凝土结构设计规范 [S]. 2004.
- [10] Marcus H. Die Vereinfachte Berechnung Platen, 2nd, Springer-Verlag[M]. Berlin: 1929.
- [11] 李传才, 向贤华, 张欣. 混凝土结构单向板与双向板区分界限的研究[J]. 土木工程学报, 2006(3):62-67.
- [12] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 2010.
- [13] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 2012.
- [14] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 2004.

Research on teaching method of bridge engineering courses

PENG Weibing, PAN Lijie, ZHANG Yong, LU Chengyuan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, P. R. China)

Abstract: In order to reach the aim of cultivating excellent civil engineers, this paper puts forward the teaching method of fault-tolerant, inspiration, mastery for bridge engineering courses, which are the core specialized courses of civil engineering, and the paper includes the following three aspects. Firstly, fault-tolerant of specialized knowledge is achieved by guiding students to find errors in textbooks and specifications. Moreover, in-depth understanding of specialized knowledge is reached through inspiring students to establish organic links of engineering hot issues and specialized knowledge. In addition, complex problems across the courses are designed, which help students to mastery specialized knowledge.

Keywords: bridge engineering; civil engineer; teaching method

(编辑 周沫)