

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2020.01.025

欢迎按以下格式引用:张桂民,王贞硕,董纪伟,等.土木工程专业材料力学课程教学典型案例分析[J].高等建筑教育,2020,29(1):181-188.

土木工程专业材料力学课程 教学典型案例分析

张桂民,王贞硕,董纪伟,刘侯轩

(中国矿业大学 力学与土木工程学院 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:在材料力学的教学中,案例教学是一种行之有效的方法,可以激发学生学习的兴趣和主动性。当今主流的材料力学教材均以机械相关的结构或构件为教学背景,很少涉及土木工程案例。历史悠久的土木工程学科,拥有众多的建设成就,也存在众多的失败案例。如果作为教学案例展示给土木工程专业的学生,不仅可以使材料力学的课程教学充满活力,还可使学生更快接触专业知识。依据材料力学课程安排,列举了与土木工程相关的几个典型案例,分别对应材料力学课程中的相关章节,可为课堂教学提供參考。

关键词:土木工程;材料力学;教学研究;典型案例

中图分类号:G642.3;TU-4

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2020)01-0181-08

材料力学是变形体力学的基础分支,是为设计工程实际构件提供必要理论支撑的技术基础课。课程研究工程结构或机械的各组成部分在正常工作条件下应满足的强度、刚度和稳定性条件。对土木工程专业来说,该课程既是后续课程的重要理论基础,又可直接解决一些基本的工程实际问题。

提高材料力学的教学效果,培养土木工程专业学生的工程意识和解决问题的综合能力,是授课教师一直努力的方向^[1-2]。近年来,案例教学对高校教学改革具有重要的推动作用,在很多课程的教学中都开展了案例教学^[3-5],并取得了良好的教学效果。材料力学的发展遵循人类认识自然的普遍规律,即:从实践中认识规律,再回到实践中指导实践。因此,案例教学是材料力学理论与工程实际紧密结合的有效教学形式之一^[6-7]。

文章分析了土木工程专业材料力学课程教学的现状,依据材料力学课程安排,列举了与土木工程相关的典型案例,拟为课堂教学提供參考。

修回日期:2019-09-04

基金项目:国家自然科学基金(41877277;51504243)

作者简介:张桂民(1985—),男,中国矿业大学力学与土木工程学院副教授,博士,主要从事力学与土木工程研究,(E-mail) gmzhang@

cumt.edu.cn。

一、案例教学现状

(一) 土木工程专业的案例教学需求

材料力学课程是高等学校土木工程专业的专业基础课。在讲授材料力学课程时,授课教师需要从基础知识服务专业内容的理念出发,尽量列举与土木工程专业相关的工程实例,这样才能抓住学生的学习兴趣。

通过土木工程实际问题,授课教师可以启发式地引导学生抽象出相关的力学模型,进一步开展强度、刚度和稳定性等方面的力学分析。这样的分析过程,才有利于增加学生的参与度,让学生直观感受到材料力学理论的实际应用,从而激发学生的学习兴趣,调动学习的积极主动性。

可见,为提高课堂教学效果,搜集并整理与土木工程相关的材料力学教学案例非常必要。

(二) 材料力学教材的不足

当今主流的材料力学教材,均以机械相关的结构或构件为教学案例背景,很少涉及土木工程专业案例^[8-12]。以中国矿业大学为例,学校的教材全部采用严圣平教授主编的《材料力学(第二版)》。教材中各章节的例题和习题均采用经典的工程结构或构件,与土木工程专业相对应的案例几乎没有^[12]。因此,作为土木工程专业的任课教师,有必要搜集相关的土木工程案例,将之与抽象的课堂理论知识结合,弥补现有教材的不足。

(三) 学习效果不佳

材料力学教学一般面向高等学校本科一年级或二年级学生,他们几乎没有任何工程背景和实践知识,更谈不上经验。在课堂教学时,如果授课教师完全照本宣科,不与专业相联系,则会使学生感到枯燥乏味。笔者在授课时发现,由于教材中所涉及的例题和习题大都针对机械类专业,部分土木工程专业学生学习消极被动,缺乏主动性,经常出现逃课或课上玩手机的现象。此外,由于课后作业与专业相关度不高,很多学生完成时也不认真,有的学生甚至抄袭他人作业,很难达到巩固所学知识的目的。

(四) 案例教学的必要性

案例教学的方式不再停留在公式的简单套用上,而是要将实际问题抽象为力学模型,强调在实践中抓主要矛盾,很好地弥补了教材例题和习题的不足。因此,作为任课教师有责任通过多种途径搜集整理与专业相关的工程实际问题,供学生分析,真正达到举一反三的效果。

二、土木工程专业材料力学教学典型案例

材料力学课程具有很强的系统性。课程中各种基本变形、应力状态和强度理论等知识都是组合变形的基础,土木工程中遇到的问题绝大多数也都是组合变形问题。在组合变形条件下,构件或结构内部各点一般处于复杂应力状态,此时要判定其强度能否满足要求,就要用到强度理论的知识,而在结构安全性校核的同时,还要进行具体的应力应变分析。能量方法作为解决问题的一种方法,可求解组合变形的静定、超静定问题及压杆稳定性等一系列问题。接下来将介绍几个与土木工程专业相关的典型工程案例,为课堂教学提供参考。

(一) 桥面极度扭转导致的塔科马悬索桥垮塌事故

在工程实际中,许多构件的主要变形形式是扭转,如转向时的汽车操纵杆、攻丝时的丝锥等,其变形特点是相邻横截面绕轴线相对转动。土木工程扭转案例主要集中在钢结构中,比较著名的一个案例是美国的塔科马悬索桥事故。

1940年11月7日,建成仅4个月的美国华盛顿州塔科马悬索桥发生垮塌事故。事故的直接原因是桥面扭转变形过大导致悬索拉断进而使桥面垮塌,更深层原因则涉及著名的卡门涡街效应^[13-14]。事实上,塔科马悬索桥建成后不久,人们就发现其在微风的吹拂下出现晃动,甚至产生强烈的扭曲变形。从图1(a)可以看出,沿着桥面的扭曲,桥面的一端上升,另一端下降。

在桥上驾车时,司机甚至可以见到另一端的汽车随着桥面的扭动一会儿消失一会儿又出现的奇观。因而,当地人幽默地将该桥称为“舞动的格蒂”。风荷载的作用导致桥面弹性颤振,弹性颤振的出现最终使风对桥的影响越来越大,整个桥梁结构像麻花一样扭曲。在一次前所未有的扭曲发生后,大桥钢缆逐一断裂,最终桥面因承载力不足而彻底倒塌,见图1(b)。当时的风速仅为64 km/h,相当于8级风。



(a) 扭动中的塔科马悬索桥



(b) 垮塌过程中的塔科马悬索桥

图1 美国塔科马悬索桥事故

该事故中桥面的横截面并非圆形,在风荷载作用下,桥面产生扭转变形,可作为教材中非圆截面杆扭转章节的教学案例。当然,塔科马大桥坍塌事故具有更深层次原因。著名力学家冯·卡门等研究发现,大桥在设计上存在不可忽视的缺陷。大桥横截面为H形结构,当风形成的高速漩涡不断从桥身两边脱离时,会对桥身产生一个交替的侧向力,在侧向力作用下桥面极度扭转,同时产生共振,最终导致桥面因强度不足而垮塌。

案例中涉及的材料力学知识还有杆件的轴向拉伸,因为在悬索桥整体垮塌之前,钢索逐一被拉断,这里的钢索可以看成轴向拉伸的杆件,亦可作为教材轴向拉伸章节的教学案例。此外,美国塔科马大桥事故还涉及空气动力学知识。将这一事故引入课堂作为案例讲述时,必然会引起学生的兴趣,激发他们学习材料力学的积极性。

(二) 压弯组合变形导致的公交站台顶棚坍塌事故

由两种或两种以上基本变形组合的情况称为组合变形。在实际工程中,大多数构件或结构受到的都是产生两种或两种以上基本变形的载荷。如起重机的横梁、偏心受压的立柱、岩土工程中承受上覆载荷的摩擦桩等。2018年1月,合肥市公交站台暴雪后顶棚坍塌事故是压弯组合变形的一个典型案例,见图2。

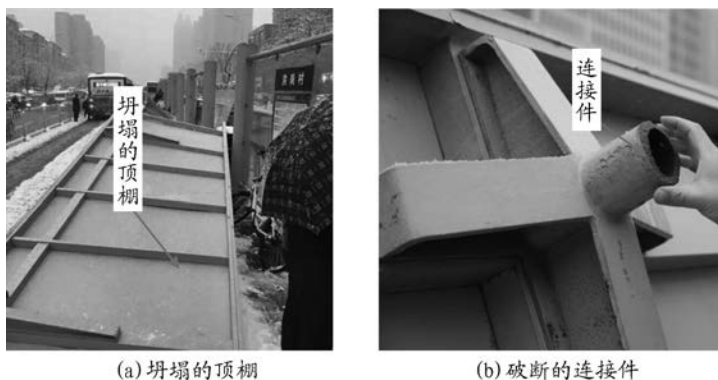


图2 合肥市公交站台暴雪后顶棚坍塌事故

2018年1月4日上午,安徽省合肥市普降暴雪,望江路沿线有多座公交候车亭顶棚发生了严重的坍塌事故^[15]。事故造成至少20名候车乘客受伤,其中1名乘客不治身亡。根据现场目击者口述,候车亭顶棚并不是缓慢倒下的,而是发出“咔嚓”的声音之后突然掉下来。由图2(b)可知,断裂口产生于承托弓和立柱的连接部位,即连接件。虽然连接件直径较小,断口粗糙,但仍可近似认为是一个平面。

为便于分析,将候车亭棚体简化为一个单立柱支撑的力学模型,如图3(a)所示。考虑到广告牌并不承受来自上方的载荷,所以在力学模型中并未考虑。由于倒塌的望江路公交候车亭顶棚被设计为平顶式,暴雪时积雪不易滑落,可认为均匀分布在顶棚上,积雪对顶棚的作用力可认为均布载荷 q 。如果将棚体看作一个底端固定的折杆,棚体上弯矩的最大值 M_1 出现在承托弓上方的顶棚上,弯矩的另一极值 M_2 则出现在连接件和立柱上,见图3(b)。由于顶棚在宽度方向上连续分布,比连接件尺寸大得多,并未因承受弯矩最大而破断。然而,由于连接件尺寸远比立柱要小,所以连接件最先断裂。

按照材料力学理论^[6-12],连接件当前处于压缩和弯曲组合变形状态。因此,可以将积雪均布载荷及顶棚自重等效到连接件的中心轴线上,最后得到一个竖直方向的集中力 F 和一个附加力偶 M ,如图3(c)所示。之后,即可采用叠加原理计算应力和变形。但是,连接件横截面的受力状态具体为何种情况,则需根据顶棚尺寸和所受均布载荷 q 进行验算。

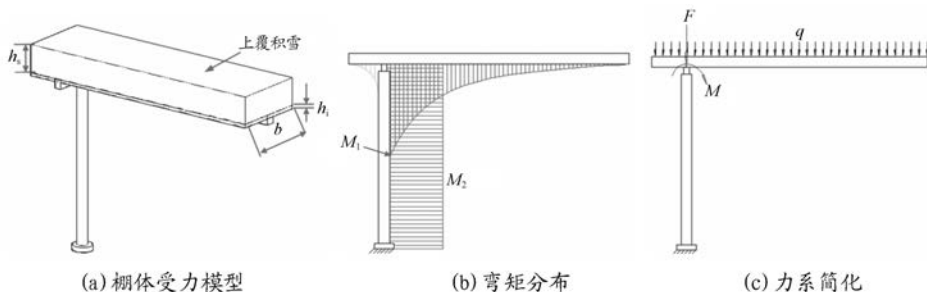


图3 棚体受力模型、弯矩分布和力系简化

事故发生后,合肥市随即停用并重新改造了望江路公交站台。目前,已无法现场勘测坍塌候车亭的原始尺寸。依据相关报道,推测相关参数并代入公式,可得到连接件上最大压应力和最大拉应力均已接近连接件的材料强度^[16]。此外,积雪厚度和积雪密度事实上是实时变化的,其对候车亭连接件的受力和断裂会产生重要影响。根据计算,当积雪厚度和密度达到某一数值后,连接件上的最大拉应力达到强度极限而破断^[16]。由合肥市望江路公交顶棚坍塌事故可以得到如下启示:极端暴雪天气固然不可忽略,连接件尺寸过小或使用材料强度不足更值得追究^[16]。

这个案例很好地诠释了课程中压弯组合变形理论的重要性,如果能在课堂中展现给土木工程专业的学生,必然引起强烈响应。

(三) 土体强度损伤和支护强度不足导致的南宁市深基坑坍塌事故

材料力学研究的主要问题之一是强度问题。根据经验,当作用在构件上的外力达到一定数值时,材料将在构件内部某一点开始发生破坏。该点的应力状态达到某一极限状态后,材料就开始失效。土木工程中关于强度理论和应力状态的案例非常多,涉及结构工程、岩土工程、桥梁与隧道工程、建筑环境与应用等各个方面。

2019年6月8日,广西南宁市东葛路延长线一处路面开裂并发生塌陷,造成东葛路延长线半幅路面塌陷,虽然没有造成人员伤亡,但却导致东葛路延长线绿地段全部封闭。通过航拍画面可以看到,塌方位于东葛路延长线由西往东方向的一处深基坑(图4)。经广西南宁市住建部门工作人员勘察,此次塌方区域长度约60 m,宽度约15 m,塌方总体积约为4 500 m³。相关资料表明,此处基坑开挖深度达到22 m。从地面以下,第一级边坡高2.4 m,按1:1进行放坡+挂网喷砼,坡顶设置截水沟;第二级边坡高19.6 m,采用“桩锚结构”进行支护。边坡的岩土组成自上而下依次为厚度5 m的素填土,厚度6.2 m的强风化泥岩,厚度8.5 m的强风化泥质粉砂岩,以及厚度大于12 m的中风化泥岩。

塌方形成后,南宁市住建部门立即组织多位专家展开事故分析^[17-18],初步结论如下:此处在建工地深基坑支护强度和方案不足,加上水管长期渗漏,导致基坑周边土体流土后被掏空,同时局部土体因泡软而强度降低,最终引发整个基坑锚索支护强度失效,形成坍塌事故。事实上,上述原因是相互影响的,基坑变形会引发周围土体流失和掏空。水管原本坐落在地基土上面,在土体被掏空后失去了支撑,在自重作用下发生断裂,导致水的渗出、地基土软化、流土,甚至基坑坍塌。

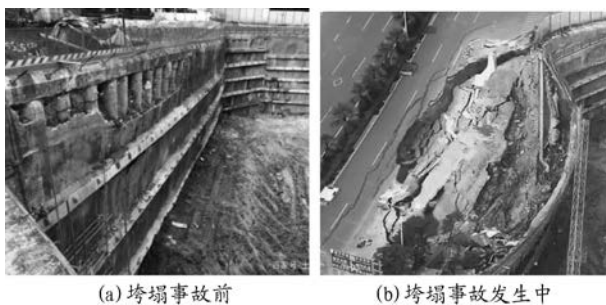


图4 南宁市深基坑坍塌事故

根据现有资料,无法对岩土工程勘察、设计、监理、施工、监测、检测等情况进行详细分析,但是,岩土工程任何一个环节出错,都可能是事故的根源。仅从基坑支护上来看,该基坑支挡结构的选择并不合理,应采用桩加内支撑而不是桩锚结构,如果增加冠梁和角支撑则可能会更好。同时,该基坑所采用的锚索和锚杆的长度、间距和锚固力亦不够,桩间距布置也有问题,桩的深度也不够。

作为教学案例,广西南宁深基坑坍塌事故可认为是土体强度不足和支护结构支护强度不足引起的,因而属于强度理论章节,只不过该案例涉及土力学和岩石力学的莫尔库伦强度理论,与材料力学课程中介绍的4种强度理论相比更为复杂,因而可作为拓展知识展示给土木工程专业的学生。

(四) 压杆失稳导致的加拿大魁北克大桥事故

在土木工程历史上,曾经发生过多次由于结构中个别压杆失稳引起整个结构破坏的重大事故。其中,最为著名的当属加拿大魁北克大桥倒塌事故^[12, 19-20]。加拿大魁北克大桥是一座悬臂桥,位于圣劳伦斯河上,中间主跨长达548.6 m,为当时最长桥跨。整个悬臂结构犹如一个巨大的天平,锚臂

和伸出臂通过中间悬跨的支撑维持平衡,如图5(a)所示。

1907年8月29日下午,魁北克大桥的南北两个锚跨各自完工,等中间悬跨完工即可完成组装。下午5时许,工人陆续收工,从中间桁架向岸边走去,突然一声巨响,南段锚跨处两根下弦杆突然被压弯,整个南端结构被牵动,连带中间悬跨一起垮塌,如图5(b)所示。近19 000 t的钢材连同86名工人一同落入劳伦斯河中。事故后,仅有11人被救起,75人当场死亡。

事实上,在此次事故发生之前,即有工程技术人员发现,南北锚跨的下弦杆拼接面并不吻合,虽然强行用外力对齐,但无法对直。同时,由于主跨的伸出臂越伸越远,出现严重弯曲的钢杆也越来越多。为赶工期,大桥的设计者和施工方并未停工,最终导致垮塌事故的发生。

1916年9月,加拿大政府又在原桥墩处建造第二座魁北克大桥。这一次他们吸取了上一次垮塌的经验,但却矫枉过正,新桥上部结构的重量是旧桥的2.5倍。过重的上部结构在合拢时出现了问题,其中一个支点突然断裂,导致其他支点受力顿时增加,进而全部结构扭曲变形,最终整个悬跨落入河中,连带13名现场工作人员的生命,见图5(c)。

调查结果表明,工程设计者严重高估了钢材的承受能力,导致两个南下弦杆的失稳,进而造成整个魁北克大桥垮塌。事后重新计算表明,设计失误导致下弦杆实际承重增加了20%,远不止设计者声称的7%~10%。另外,出于美观考虑,魁北克大桥下弦杆被设计成微弯杆,制造难度更高,也降低了杆件的稳定性。



(a) 魁北克大桥设计图



(b) 第一次坍塌事故后



(c) 第二次坍塌事故后

图5 加拿大魁北克大桥事故

在经历了两次惨痛的教训之后,魁北克大桥终于在1917年建成通车。1922年,加拿大七大工程学院共同出资将建桥过程中倒塌的全部残骸买下,然后把这些残骸打造成一枚枚戒指,发给每年从工程系毕业的学生。这些戒指被设计成扭曲的钢条形状,代表作为土木工程师所应有的谦逊,也记忆下土木工程师无法忘记的教训和耻辱。

锚跨中两根下弦杆的失稳,导致加拿大魁北克大桥的坍塌,进而带走了数十甚至上百人的生命。这一案例的讲述,必然引起学生的警醒,一扫压杆稳定学习的枯燥。

(五) 安全绳被冲击破断导致的津巴布韦女游客蹦极坠落事故

当构件本身处于加速运动状态,或者正受到处于运动状态的物体作用时,构件受到的载荷则是动载荷。在动载荷作用下,构件内部各点会有速度的改变,产生加速度。土木工程中有很多构件承受动载荷,比如,起重机加速起吊重物时,起重机的吊索受到的惯性力,夯土机打夯时,重锤与地基在碰撞瞬间所产生的冲击载荷,工程上爆破拆除房屋等构筑物时,炸药对构筑物的爆破力也属于动载荷。

2011年12月31日,澳大利亚女孩艾琳·兰沃斯在位于赞比亚和津巴布韦交界处的维多利亚瀑布风景区旅游时,决定用蹦极来纪念这次非洲之行,同时为自己送上一个特别的新年礼物。不幸的是,由于安全绳索断裂,艾琳坠入波涛汹涌的“鳄鱼河”中,如图6所示。万幸的是,艾琳奇迹般生还^[21]。

蹦极时,人对安全绳索的作用力其实也是一种动载荷,简单计算可知该载荷是静载荷的数倍。通过分析,不难发现此处安全绳索强度不符合要求。如果将这个案例引入课堂,作为课程动载荷的典型示例,显然可以提高学生的学习兴趣。

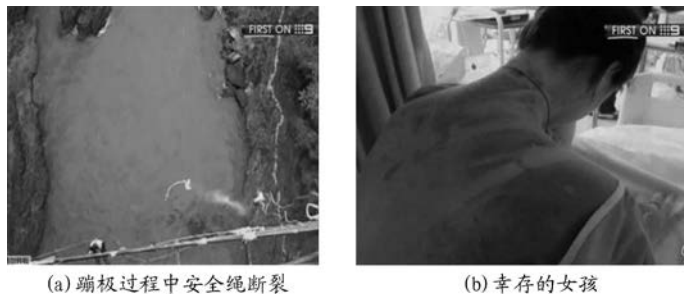


图6 津巴布韦游客蹦极时绳索断裂事故

前述各案例对应材料力学课程的几个章节,授课教师可将这些案例以PPT的形式融入课件,从而激发土木工程专业学生的学习兴趣,提升其学习参与感和积极性。从案例分析的过程中,学生不仅感受到材料力学理论不再抽象,真正做到系统掌握理论知识,还可以从案例中汲取经验教训,逐步树立问题意识,养成深入思考的习惯。

然而,教学案例的搜集和分析是一个经常性的工作。作为授课教师,需要在生活中关注与土木工程专业相关的热点问题,从中提炼适合材料力学课程的教学案例,进而让材料力学课程的教学充满活力,只有这样才能让土木工程专业学生更加喜欢材料力学课程。此外,材料力学的发展离不开历史上诸多力学家的艰辛工作。比如,著名数学家、力学家欧拉一生历经挫折,因劳累过度而双目失明,仍勤奋工作,逝世当天下午还在石板上进行演算,为世人留下了计算压杆稳定的经典公式。力学家的个人经历蕴含了多方面的教育内涵,如果以教学案例的形式讲述给学生,亦可使学生了解科学工作者在探索科学奥秘过程中的艰辛,为顽强拼搏、克服困难打下基础。

三、结语

案例教学是材料力学教学中一种行之有效的方法,可以服务于土木工程专业,补充教材中的例题和习题,激发学生的学习兴趣。依据材料力学课程安排,列举了与土木工程相关的几个典型案例:1)桥面极度扭转导致的塔科马悬索桥垮塌事故;2)连接件压弯组合变形导致的合肥市公交站台顶棚坍塌事故;3)土体强度损失和支护强度不足导致的南宁市深基坑坍塌事故;4)压杆失稳导致的加拿大魁北克大桥事故;5)安全绳冲击破断导致的津巴布韦女游客蹦极坠落事故等。这些案例对应材料力学课程中的扭转变形、压弯组合变形、强度理论、压杆稳定及动载荷等章节,可为课堂教学提供参

参考文献:

- [1]李炜明. 土木工程材料力学课程教学的整体理论体系及其内在逻辑关系[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(4): 67-69.
- [2]倪振强. 普通本科院校土木工程专业材料力学课程教学探索[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(1): 51-53.
- [3]袁立群, 崔诗才, 赵庆双. 新工科背景下土力学案例教学研究[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(2): 58-62.

- [4]王迎超,耿凡,张成林.岩石力学课程的现状与案例教改思路探讨[J].高等建筑教育,2013,22(6):51-55.
- [5]张先忠,闫祥梅.土木工程专业案例教学应用及成效[J].管理工程师,2015,20(1):69-71.
- [6]赵春香,于月民,盖芳芳.材料力学案例教学的实践与研究[J].大学教育,2015(10):148-149.
- [7]曹惠,尹晓丽,张潇华.启发式教学在材料力学课程中的探索与实践[J].高教论坛,2018(3):70-72.
- [8]刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [9]孙训方,方孝淑,关来泰.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [10]郭战胜,施冬莉,宋亦诚.材料力学[M].上海:同济大学出版社,2013.
- [11]闫晓鹏.材料力学[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [12]严圣平,马占国.材料力学[M].北京:科学出版社,2018.
- [13]童智洋.新塔科马海峡大桥设计与施工[J].世界桥梁,2010,38(1):1-4.
- [14]万田保.60年后塔科马大桥的空气动力学研究[J].国外桥梁,2001,29(4):45-49.
- [15]张娅子.合肥公交站亭倒塌事故调查出炉:为工程重大安全事故[EB/OL].(2018-02-04)[2019-06-19].<http://www.chinanews.com/sh/2018/02-04/8440629.shtml>.
- [16]张桂民,王贞硕.暴雪后公交候车亭顶棚坍塌事故的力学分析[J].力学与实践,2019,41(3):283-287.
- [17]土木智库.南宁深基坑坍塌事故原因初步确定,设计图纸公布[EB/OL].(2019-06-12)[2019-06-19].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1636099866858085864&wfr=spider&for=pc>.
- [18]监理门户网.惊心动魄!广西南宁一工地基坑边坡塌方[EB/OL].(2019-06-10)[2019-06-19].<http://news.job2299.com/category/article/2/20190610092551987>.
- [19]叶华文,张澜,秦健淇,等.魁北克大桥垮塌全过程分析[J].中外公路,2015,35(5):138-142.
- [20]叶华文,陈醉,曲浩博.魁北克大桥连续倒塌过程及结构冗余度分析[J].世界桥梁,2017,45(1):76-81.
- [21]东方时空.津巴布韦:蹦极者坠入“鳄鱼河”虎口险逃生[EB/OL].(2012-01-09)[2019-06-19].<http://tv.cntv.cn/video/C10336/303640ae19f041ca9c68787054119c6a>.

Research on typical cases related to the teaching of material mechanics in civil engineering

ZHANG Guimin, WANG Zhenshuo, DONG Jiwei, LIU Yuxuan

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,
School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and
Technology, Xuzhou 221116, P. R. China)

Abstract: In the teaching of material mechanics, case teaching is an effective method to stimulate students' interest and initiative in learning. At present, mainstream textbooks for material mechanics are based on mechanically related structures or components, and rarely involve civil engineering cases. In the long history of civil engineering, there are many construction achievements and many failure cases. If these civil engineering cases are selected as teaching cases, they can not only make the course full of vitality, but also enable students to get more professional knowledge. Based on the curriculum of material mechanics, several representative cases related to civil engineering are listed in this paper, corresponding to the relevant chapters in the course of material mechanics, which can provide reference for classroom teaching.

Key words: civil engineering; material mechanics; teaching research; typical cases

(责任编辑 周沫)