

注浆加筋减载涵洞土压力和内力的数值分析

马强,李丽华,肖衡林

(湖北工业大学土木工程与建筑学院,湖北武汉 430068)

摘要:为降低高填方涵洞所受荷载及涵体内力,提出了涵洞注浆加筋减载方法。采用有限元数值模拟计算了仅注浆加固和注浆加固结合加筋减载后的涵顶土压力和拱圈内力,对涵洞两侧不同范围注浆加固时的减载效果进行对比分析。通过参数分析,研究了格栅刚度及注浆区模量对涵顶土压力及拱圈内力的影响。结果表明,涵墙外注浆加固范围可取1/2涵洞宽度;在注浆加固区顶部铺设土工格栅能进一步降低涵顶土压力和拱圈内力;增大格栅刚度对提高减载效果作用很小;注浆区模量对涵顶土压力和拱圈内力有较大影响,当注浆区模量接近100 MPa时,涵顶土压力和拱圈内力达到较小值,进一步提高注浆区模量,涵顶土压力和拱圈内力减小并不明显。

关键词:涵洞;土压力;涵体内力;减载效果;数值模拟

中图分类号:TU432

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)03-0037-05

Numerical analysis of the earth pressures and internal forces of the culvert with surrounding grouting and reinforcement//MA Qiang, LI Lihua, XIAO Henglin (*School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

Abstract: The load reducing method of the culvert with surrounding grouting and reinforcement is introduced to reduce the earth pressures and internal forces of highway culverts under high fills. Earth pressures and internal forces of the culvert with grouting and grouting covered with reinforcement are calculated by numerical simulations using finite element method, and the load reducing effects with different lateral grouting areas are compared. Additionally, the effects of geogrid stiffness, and the modulus of grouting on the earth pressures as well as internal forces of culvert are studied on the basis of parameter analysis. The results show that the grouting width surrounding the culvert wall is half of the culvert width, while the installation of geogrid reinforcement on the top of grouting area can further reduce earth pressures and internal forces. The increase of the geogrid stiffness makes very little effect on load reduction and the modulus in grouting area has a massive impact on earth pressures and internal forces. When the modulus is close to 100 MPa, earth pressures and internal forces reach at the lower values, which insignificantly decline as the increase of modulus.

Key words: culvert; earth pressure; internal force of the culvert body; load reducing effect; numerical simulation

高填方路段的涵洞上覆填土高度多在10 m以上,有时甚至会超过50 m^[1]。由于填土荷载大,地形条件复杂,涵洞的受力及变形特性往往较为复杂^[2-3],涵体存在应力集中和不均匀沉降等问题,容易引起各种不同程度的病害,在工程界有“十涵九裂”之说^[4]。针对高填方涵洞土压力过大的问题,国内外学者对涵洞减载措施进行了研究。顾安全等^[5]通过室内模型试验,对涵洞顶部铺筑松土、谷壳、稻草等柔性填料的减荷效果进行了研究。王晓谋等^[6]利用室内模型试验研究了涵顶铺设海绵填料时的减载效果,基于弹性理论推导了减载条件下

的涵顶土压力计算公式。白冰等^[7-8]将EPS板作为涵顶减压材料设计了模型试验,并通过有限元模拟,分析了地下构筑物周边土压力分布情况。张卫兵等^[9]利用现场原位试验,测试了涵顶铺设不同厚度EPS板时的减载效果。杨锡武等^[10]提出了一种高填方涵洞加筋桥减载方法,并开展了系列模型试验,证实了该方法的减载效果。郑俊杰等^[11]通过理论分析,推导了加筋减载条件下涵顶土压力的计算公式。马强等^[12]通过原位试验分析了涵顶采用三向格栅进行加筋减载的减载效果。Zheng等^[13]和Sun等^[14]分别应用有限元数值模拟,研究了在深埋地下

基金项目:国家自然科学基金(51208187);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0962);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y12-11)

作者简介:马强(1983—),男,湖北丹江口人,副教授,博士,主要从事道路工程的研究。E-mail:maqiang927@163.com

构筑物顶部铺设土工格栅和轻质泡沫材料后,构筑物顶部的土压力分布及构筑物结构受力情况;Dancygier等^[15]通过减载条件下深埋结构与土相互作用的分析,得到了涵管顶部柔性材料的最佳铺设范围。

在对注浆加筋减载专利技术进行介绍的基础上,本文采用有限元数值模拟,对涵洞两侧不同范围进行注浆加固时的涵顶土压力和拱圈内力进行计算,分析了注浆加固结合加筋减载方法(以下简称注浆加筋减载方法)的减载效果,通过参数分析,获得了该减载方法的加固区范围、格栅刚度及注浆区模量的合理取值范围。

1 注浆加筋减载方法

要实现涵洞减载,从受荷条件考虑,就是要降低涵体所受到的土压力,并优化涵洞受力,让涵体受力合理,以降低薄弱构件的内力值。为降低涵洞所受荷载和涵体内力,笔者提出了一种涵洞注浆加筋减载方法,该方法结构示意图如图1所示。

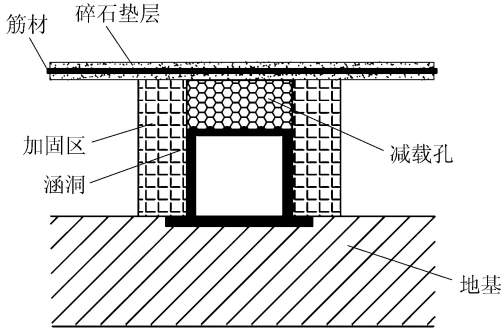


图1 涵洞注浆加筋减载结构的剖面示意图

图1所示的注浆加筋减载结构由加固区、筋材、碎石垫层和减载孔组成,加固区位于涵洞的两侧,减载孔位于涵顶的正上方,筋材和碎石垫层位于减载孔上方。加固区、筋材、碎石垫层和减载孔组成一个减载体系,通过加固区上填土的土拱效应和筋材的张拉膜效应,使大部分填土荷载传递至加固区,并沿加固区传递至地基。

注浆加筋减载方法在原有加筋减载方法的基础上,通过对涵洞填筑碎石并注浆来提高涵侧土体刚度,可以有效克服原有普通减载措施的以下不足:①涵顶加筋减载效果有限,涵顶开裂现象仍然存在;②涵顶荷载转移至侧墙,涵洞侧墙开裂现象有所增加;③涵洞受力及变形特性受复杂地质影响大;④涵洞受力不对称,易引起涵洞涵顶与墙身分离开裂现象;⑤涵洞内、外土柱刚度差异不明显,筋材效率没有得到充分发挥。本文将通过数值模拟对注浆加筋减载方法的减载效果进行分析。

2 数值模拟分析

由于沟埋式涵洞所处地形条件对涵体受力会产生影响,为对比分析注浆加固法和注浆加筋减载方法的减载效果,本文以上埋式涵洞为研究对象,采用PLAXIS软件建立模型,数值模拟计算参数由土样的室内试验获得,见表1,涵洞几何模型如图2所示,图中A、B、C、D、E为注浆区代号。

表1 数值模拟计算参数

基础	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ 剪胀角/ (°)	密度/ (kg·m ⁻³)	
涵洞	30000	0.20			2551	
填土	8	0.30	30	15	0	1633
地基土	6	0.32	30	15	0	1633
加固区	150	0.28	80	63	3	1735

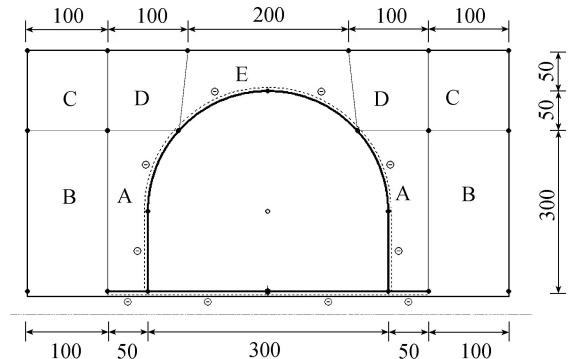


图2 涵洞几何模型注浆区示意图(单位:cm)

数值分析模型的左右边界采用水平向约束,模型底面采用固定约束模拟基岩,在涵洞与填土之间、填土与格栅之间采用接触单元。涵洞轴线距离模型左右边界均为15m,涵洞基底以下5m以内为地基土,距基底5m处为固定约束面以模拟基岩。路堤填土高度15m(自地基土顶面算起),为便于描述不同加固范围,将注浆区域划分为A~E区,如图2所示,分析不同注浆范围的涵体减载效果。

采用具有较高精度的15节点三角形单元对图2所示的涵洞几何模型进行网格划分。根据材料特性,对涵洞和涵洞基础采用理想线弹性模型,对路堤填土和地基土采用服从摩尔-库伦屈服准则的理想弹塑性模型进行描述。

地下水头位于基岩以下,不考虑地下水的影响,路堤填筑时采用一次性加载模拟路堤快速填筑,对无减载和不同注浆加固条件下的涵顶土压力及内力进行计算。

方案1~6分别对涵周所示的不同区域进行注浆加固,通过数值模拟得到不同注浆加固范围时涵顶土压力及拱圈内力情况,列于表2中。

表2 不同减载方案的数值模拟结果

减载方案	注浆区域	涵顶最大土压力/kPa	拱圈最大轴力/kN	拱圈最大剪力/kN	拱圈最大弯矩/(kN·m)
无减载措施		262.5	450.7	114.6	95.7
方案1	A	243.8	439.8	97.9	79.6
方案2	A、B	245.4	416.7	86.2	76.2
方案3	A、B、C	232.3	385.4	90.0	71.8
方案4	A、B、C、D、E	253.7	457.5	79.8	77.8
方案5	A、D、E	307.6	504.1	93.1	89.8
方案6	A、B、C+格栅	219.6	385.1	75.0	64.3

减载方案1对图2所示A区域采用卵石填筑,并对卵石进行注浆处理,使加固区模量达到150 MPa。加固后涵顶土压力分布与无减载时相比发生了变化,涵顶最大土压力约为243.8 kPa,相比无减载条件减小了约7.1%;拱圈轴力与无减载条件相比减小了约2.4%;拱圈剪力减小了约14.5%;拱圈弯矩减小了约16.7%。

减载方案2对图2所示A区和B区采用卵石填筑,并对卵石进行注浆处理,使加固区模量达到150 MPa。使用该方案后涵顶最大土压力约为245.4 kPa,相比无减载条件减小了约6.5%;拱圈轴力与无减载条件相比减小了约7.5%;拱圈剪力减小了约24.8%;拱圈弯矩减小了约20.4%。

减载方案3对图2所示A、B、C区采用卵石填筑,并对卵石进行注浆处理,使加固区模量达到150 MPa。使用该方案后涵顶最大土压力约为232.3 kPa,相比无减载条件减小了约11.5%,拱圈轴力与无减载条件相比减小了约14.5%,拱圈剪力减小了约21.5%,与减载方案2相比略有增加,但从土压力、拱圈轴力和弯矩来看,受力更为合理。拱圈弯矩减小了约25.0%。

减载方案4对图2所示A~E区采用卵石填筑,并对卵石进行注浆处理,使加固区模量达到150 MPa。使用该方案后涵顶最大土压力约为253.7 kPa,相比无减载条件减小了约3.4%。拱圈轴力与无减载条件相比增大了约1.5%。拱圈剪力减小了约30.4%,拱圈弯矩减小了约18.6%。

减载方案5对图2所示A、D、E区采用卵石填筑,并对卵石进行注浆处理,使加固区模量达到150 MPa。使用该方案后涵顶最大土压力约为307.6 kPa,相比无减载条件增大了约17.2%。拱圈轴力与无减载条件相比增大了约11.9%。拱圈剪力减小了约18.7%,拱圈弯矩减小了约6.2%。

综合比较上述5个减载方案,可以看出减载方案3能够获得较好的减载效果,即注浆加固区范围选取图2中的A、B、C区。从图2可知,涵墙外注浆加固范围可取1/2涵洞宽度。

为进一步提高减载效果,在方案3的基础上设计了方案6,即在A、B、C区进行注浆加固的同时,在加固区的顶面铺设一层土工格栅进行加筋(格栅铺设宽度不小于加固区宽度),见图3,图中数字表示几何模型中节点编号。计算分析了注浆加固结合格栅加筋后涵顶土压力和拱圈内力状况。计算结果:方案6涵顶最大土压力约为219.6 kPa,比无减载条件下减小了42.9 kPa,减幅约为16.3%。拱圈轴力与无减载条件相比减小了约65.6 kN,减幅约为14.6%。拱圈剪力减小约39.6 kN,减幅约为34.6%,拱圈弯矩减小约31.4 kN·m,减幅约为32.8%。通过对比方案3未加筋条件下的涵顶土压力及拱圈内力可知,加筋后涵顶土压力进一步减小了12.7 kPa,拱圈剪力和弯矩最大值也分别减小了15 kN和7.5 kN·m。由此可知,方案6的减载效果最佳。

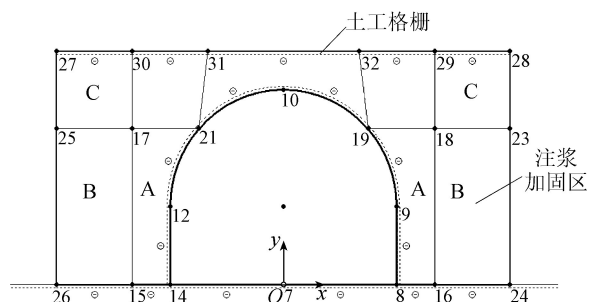


图3 注浆加筋减载模型

3 参数分析

通过调整格栅刚度和注浆区模量,分析这两者对涵洞受力的影响,比较不同变量下的减载效果,以便为注浆加筋法的设计施工提供依据。

3.1 格栅刚度

对涵洞进行注浆加固结合加筋减载时所采用的格栅刚度对减载效果的影响进行了计算分析。经过计算可知,不同格栅刚度下涵顶土压力分布和拱圈内力分布相差不大,将不同格栅刚度下的涵顶土压力、拱圈轴力、剪力和弯矩列于表3中。

表3 不同格栅刚度时涵顶压力及拱圈内力

格栅刚度/ (kN·m)	涵顶最大 土压力/kPa	拱圈最大 轴力/kN	拱圈最大 剪力/kN	拱圈最大弯矩/ (kN·m)
10	218	376	88	70
20	218	376	88	70
50	219	378	85	69
100	219	378	85	69
200	219	383	79	66
500	220	385	76	64
1 000	220	385	75	64
2 000	220	385	75	64
5 000	220	385	75	64

由表3可以看出,随着格栅刚度的增大,涵顶土压力变化不大,格栅刚度从10 kN/m增大到5 000 kN/m,涵顶土压力增大2 kPa,增幅约为0.9%。拱圈轴力增大9 kN,增幅约为2.4%。拱圈剪力减小13 kN,拱圈弯矩减小6 kN·m,减小幅度均不大。由此可知,在选取格栅时,可以不以减载效果作为格栅刚度的确定依据,而根据格栅变形要求来选择刚度合适的格栅。

3.2 注浆区模量

采用图2所示几何模型,得到不同注浆区模量下涵顶最大土压力分布如图4所示,拱圈轴力、剪力和弯矩如图5~7所示。

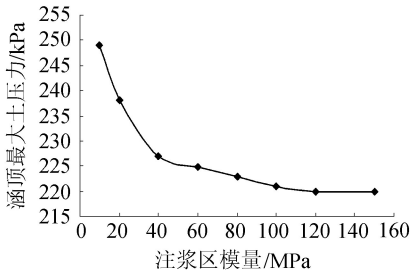


图4 不同注浆区模量时的涵顶最大土压力

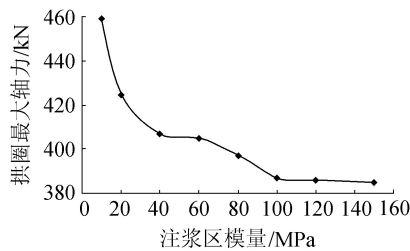


图5 不同注浆区模量时的拱圈最大轴力

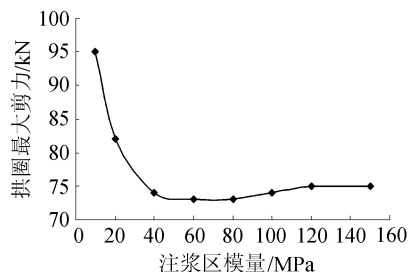


图6 不同注浆区模量时的拱圈最大剪力

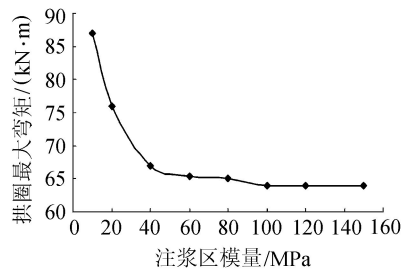


图7 不同注浆区模量时的拱圈最大弯矩

由图4可知,随着注浆区模量的增加,涵顶最大土压力逐渐减小,注浆区模量从10 MPa增大到150 MPa,涵顶土压力减小29 kPa,减幅约为11.6%。当注浆区模量达到100 MPa以后,注浆区模量的提高对涵顶土压力的影响很小。

由图5可以看出,随着注浆区模量的增加,拱圈最大轴力逐渐减小,注浆区模量从10 MPa增大到150 MPa,拱圈轴力减小74 kN,减幅约为16.1%。当注浆区模量达到100 MPa以后,注浆区模量的提高对拱圈最大轴力的影响很小。

由图6可以看出,初始阶段随着注浆区模量的增加,拱圈最大剪力急剧减小,注浆区模量从10 MPa增大到40 MPa,拱圈最大剪力减小至73 kN,减幅约为23%。当注浆区模量继续增大,拱圈最大剪力略有增加,并最终稳定在75 kN左右。

由图7可以看出,随着注浆区模量的增加,拱圈最大弯矩呈减小趋势。注浆区模量从10 MPa增大到40 MPa,拱圈最大弯矩减小了21 kN·m,减幅约为26%。当注浆区模量大于40 MPa后,注浆区模量增加引起的拱圈弯矩变化很小。

综上所述,随着注浆区模量的增大,总体上涵顶土压力及拱圈内力均呈减小趋势,并最终趋于稳定,当注浆区模量大于100 MPa后,涵顶土压力和拱圈的内力达到较小值,进一步提高注浆区模量,涵顶土压力和拱圈内力减小并不明显,因此在对注浆区进行换填或加固时,注浆区的模量达到100 MPa左右即可获得较好的减载效果。

4 结论

a. 在对高填方涵洞采用注浆加固结合加筋减载措施时,为取得较好的减载效果,可选取左右涵墙外各1/2涵洞宽度的填土范围作为注浆加固区的宽度。

b. 通过在注浆加固区顶部铺设土工格栅能够进一步降低涵顶土压力和拱圈内力。

c. 增大格栅刚度对提高减载效果影响很小,在选择格栅时,可不考虑刚度对减载效果的影响,只需格栅刚度满足格栅抗拉和变形要求。

d. 注浆区模量对涵顶压力和拱圈内力有较大影响,当注浆区模量接近 100 MPa 时,涵顶土压力和拱圈内力达到较小值,进一步提高注浆区模量,涵顶土压力和拱圈内力减小并不明显,因此在对接浆区进行换填或加固时,适当提高注浆区的模量至 100 MPa 左右即能获得较好的减载效果。

参考文献:

[1] 郑俊杰,马强,陈保国. 高填方涵洞地基承载力分析 [J]. 华中科技大学:自然科学版,2009,37(4):115-118. (ZHENG Junjie, MA Qiang, CHEN Baoguo. Analysis of ground bearing capacity of high fill culvert [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2009, 37(4): 115-118. (in Chinese))

[2] 马强,郑俊杰,张军. 山区涵洞受力影响因素的数值模拟分析 [J]. 合肥工业大学:自然科学版,2009,32(10):1514-1517. (MA Qiang, ZHENG Junjie, ZHANG Jun. Numerical simulation on influencing factors of mountainous culvert pressures [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2009, 32(10): 1514-1517. (in Chinese))

[3] CHEN Baoguo, ZHENG Junjie, HAN Jie. Experimental and numerical study on culvert in trenches [J]. Journal of Performance for Constructed Facilities, ASCE, 2010, 24(3):223-234.

[4] 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 Anquan. Vertical earth pressure on top-buried pipes and caves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 3-15. (in Chinese))

[5] 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 Anquan, GUO Tingting, WANG Xingping. 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))

[6] 王晓谋,顾安全. 上埋式管道垂直土压力的减荷措施 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3):83-89. (WANG Xiaomou, GU Anquan. Research on methods of vertical earth pressure reduction on top-buried pipes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 83-89. (in Chinese))

[7] 白冰,陆士强. 聚苯乙烯泡沫塑料的测试及其在土工中的应用 [J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2):104-108. (BAI Bing, LU Shiqiang. Test of expanded polystyrene foam and its use in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of

Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 104-108. (in Chinese))

[8] 白冰. 减荷条件下上埋式圆形结构物周边土压力分析 [J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2):14-17. (BAI Bing. Earth pressure distribution around top-buried type circular structures under reducing load condition [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 14-17. (in Chinese))

[9] 张卫兵,刘保健,谢永利. 基于 EPS 减荷措施的高填涵洞试验研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(12):54-57, 98. (ZHANG Weibing, LIU Baojian, XIE Yongli. Field test and numerical simulation study on the load-reducing effect of EPS on the highly filled culvert [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(12): 54-57, 98. (in Chinese))

[10] 杨锡武,张永兴. 山区公路高填方涵洞加筋桥减载方法及其设计理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9):1561-1571. (YANG Xiwu, ZHANG Yongxing. Study on the method and theory of load reduction by reinforcement bridge for the culvert beneath high filling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1561-1571. (in Chinese))

[11] 郑俊杰,马强,张军. 加筋减载涵洞的涵顶土压力计算 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7):1135-1141. (ZHENG Junjie, MA Qiang, ZHANG Jun. Calculation of vertical earth pressure on load reduction culverts under embankments by reinforcement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1135-1141. (in Chinese))

[12] 马强,郑俊杰,张军. 高填方涵洞加筋桥减载的现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2337-2342. (MA Qiang, ZHENG Junjie, ZHANG Jun. Experimental investigation of high embankment culvert treated by imperfect ditch overlaid with a geogrid layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2337-2342. (in Chinese))

[13] ZHENG Junjie, LUO Depi, MA Qiang. Numerical analysis of slab culvert beneath imperfect ditch covered with geogrid layers [C]//2011 International Conference on Green Building, Materials and Civil Engineering. Shangri-la: [s. n.], 2011:3338-3341.

[14] SUN L, HOPKINS T C, BECKHAM T. Stress reduction by ultra-lightweight geofoam for high fill culvert [C]//13th Great Lakes Geotechnical and Geoenvironmental Conference. Milwaukee: [s. n.], 2005:146-154.

[15] DANCYGIER A N, YANKELEVSKY D Z. A soft layer to control the soil arching above a buried structure [J]. Engineering Structures, 1996, 18(5):378-386.

(收稿日期:2014-03-05 编辑:骆超)