

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0087-05

# 高填方刚性涵洞 EPS 板减载模型试验研究

邓 谦<sup>1</sup>, 马 强<sup>1</sup>, 胡 刚<sup>2</sup>, 董核铭<sup>2</sup>

(1 湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068; 2 十堰市交通投资有限公司, 湖北 十堰 442000)

**[摘 要]** 为确定 EPS 板减载效果与其材料的密度和厚度关系, 在柔性填料减载特性的基础上, 开展大型室内模型试验, 主要研究了厚度为 0、1 cm、2 cm、4 cm 和 6 cm, 密度  $\rho$  为 12 kg/m<sup>3</sup> 和 25 kg/m<sup>3</sup> 的 EPS 板与涵顶、涵侧的土压力减载率的关系, 同时对土体内部的土压力分布机理进行分析。试验结果表明, 只考虑 EPS 板厚度对涵顶的减载具有局限性; 在相同的 EPS 板厚时, 采用密度为 12 kg/m<sup>3</sup> 的 EPS 板减载效果更佳。在竖向荷载为 2 MPa 时, 涵顶土压力的减载效率最高, EPS 板的厚度在 4 cm 左右较为适宜; 同时表明 EPS 板的厚度和密度对涵顶土压力减载效果相互交叉影响, EPS 板的厚度和密度的合理选择是试验结果的重要因素。

**[关键词]** 高填方涵洞; 土压力; EPS 减载; 厚度; 密度; 减载率

**[中图分类号]** TU411

**[文献标识码]** A

高填方刚性涵洞广泛应用于公路、铁路工程中, 但填土和涵洞结构的刚度差异造成涵顶承受较大的土压力<sup>[1-3]</sup>, 常常导致涵洞结构发生病害<sup>[4]</sup>。EPS 板作为可压缩性材料可用于涵顶减载, 为此, 国内外学者对其受力特性和减载效果展开了系列研究。王晓谋将海绵填料铺设在涵顶进行室内模型试验, 得出柔性填料的变形模量和厚度必须与填土高度相协调<sup>[5]</sup>。郭婷婷分析了不同 EPS 板厚度下涵顶土压力的减载特性<sup>[6]</sup>。顾安全、Vaslestad、Sun 等通过数值分析和长期原位试验, 得出 EPS 板能有效减小涵顶和涵侧的土压力与不均匀沉降<sup>[7-9]</sup>。这些研究对 EPS 板在涵洞减载中的应用做出了较多的介绍, 但 EPS 板减载特性与其材料密度和厚度有关, 现有研究成果未能全面考虑 EPS 板的密度和厚度对涵顶土压力减载效果的交叉影响关系。综上, 本文通过大型室内模型试验, 具体探讨了柔性填料 EPS 板的厚度与密度对涵顶、涵侧的土压力减载效果的影响, 同时对土体内部土压力分布机理进行分析, 为 EPS 板的减载研究进一步提供参考。

载装置完成。试验数据的采集器通过型号为 TST3826E-1 的静态应变仪, 以及微型应变式土压力计型号为 XTR-2030, 量程为 0.1 MPa。模型箱的尺寸为 200 cm×80 cm×76 cm, 模型箱的正侧面由钢化玻璃组成, 四周边角由实木和脚钢固定(图 1)。

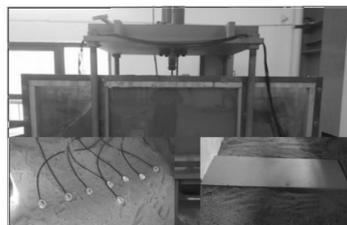


图 1 试验模型箱

土压力盒沿着涵洞上部中轴线对称放置, 相互之间的间距均为 10 cm, 土压力盒分两层布置, 层间距也为 10 cm, 以便量测荷载作用下填土内部应力分布情况。其分布如图 2 所示。

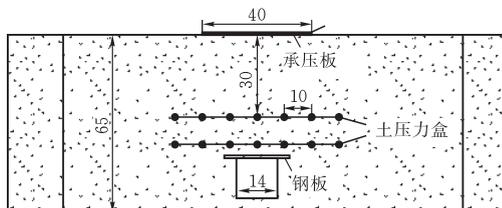


图 2 试验模型图 cm

## 1 试验仪器、材料和方法

### 1.1 试验仪器

试验在自主设计的模型箱, 配合半自动液压加

[收稿日期] 2018-10-15

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51678223); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201605)

[第一作者] 邓 谦(1992-), 男, 湖北荆州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为道路和环境岩土

[通信作者] 马 强(1983-), 男, 湖北丹江口人, 工学博士, 湖北工业大学副教授, 研究方向为道路和环境岩土

## 1.2 试验材料

本试验材料包括武汉地区的砂土,含水率为5%,密度为1.75 g/cm<sup>3</sup>。试验的涵洞采用材质为Q235的碳素钢,其外形规格是内径为14 cm×14 cm方形钢,壁厚为0.5 cm。所模拟的原型涵洞盖板和涵洞侧墙均采用预制钢筋混凝土材料。试验中模型与原型的应力相似关系为

$$\frac{\sigma_p}{\gamma_p l_p} = \frac{\sigma_m}{\gamma_m l_m}, \frac{E_p}{\gamma_p l_p} = \frac{E_m}{\gamma_m l_m}, \mu_p = \mu_m$$

其中下标  $m$  表示模型,下标  $p$  表示原型<sup>[7]</sup>,原型混凝土涵洞与模型碳素钢涵洞的力学指标列于表1,通过对表1中两组参数的计算分析,得出两组参数满足一定的组合相似指标。砂土颗粒级配曲线见图3。

表1 管涵力学指标参数

参数	几何尺寸/m	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	抗压强度 $\sigma_p$ /MPa
原型	2.8×2.8	30	0.20	25.20	38.6
模型	0.14×0.14	200	0.22	78.5	235

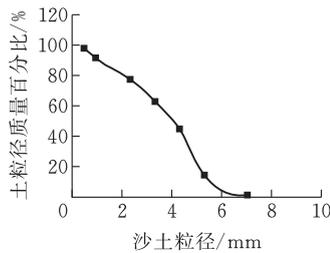


图3 砂土颗粒级配曲线

## 1.3 试验方法

根据相似比与加载条件分析,确定模型的几何相似比尺寸为  $C_l = 1:20$ ,试验最大填砂土高度为

40 cm,相当于实际涵洞路堤填方为8 m, EPS板宽等于1.25倍涵宽( $D=1.25B$ )。在涵顶上方对称布置两层土压力盒,并填砂至40 cm后整平。在填砂顶面放置承压钢板(79 cm×40 cm×1.4 cm),通过液压驱动装置分级加载,模拟高填方上埋式刚性涵洞受力情况。加载时,每0.5 MPa为一级荷载,通过承压板将荷载传递至下层砂土中,加载压力稳定后,通过静态应变测试分析仪收集试验数据和沉降变化量。模型参数见表2,试验方案见表3。

表2 模型参数表

模型试验	填砂高/cm	液压加载压力/MPa							砂土容重/(kN·m <sup>-3</sup> )
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	
模拟填高 $H$ /m	8	12.5	16.9	21.4	F.9	30.4	34.8	39.3	17

表3 试验方案表

工况	EPS厚度/cm	EPS密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
工况1	0	—
工况2	1	25
工况3	2	25
工况4	4	25
工况5	6	25
工况6	1	12
工况7	2	12
工况8	4	12
工况9	6	12

试验针对不同厚度  $h$  和密度  $\rho$  的 EPS板,进行分级加载试验。选取 EPS板厚  $h$  分别为0、1 cm、2 cm、4 cm和6 cm,密度  $\rho$  为12 kg/m<sup>3</sup>和25 kg/m<sup>3</sup>,涵顶竖向加载压力分别为0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa、2 MPa、2.5 MPa、3 MPa和3.5 MPa,分析钢管涵顶、涵侧土压力变化规律。其中 EPS板变形分为弹性、塑性、硬化3个阶段,铺设在涵顶的 EPS板,开始由于填土荷载小而处于弹性状态,压缩变形很小减荷效果有限;当填土到一定高度, EPS板进入塑性状态,压缩变形迅速增大,土拱效应越来越明显,使涵顶垂直土压力大大减小, EPS

板应力应变关系如图4所示。

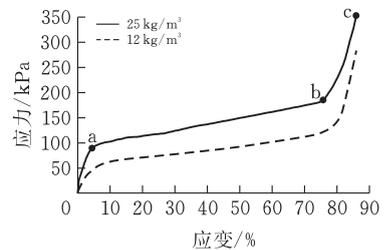


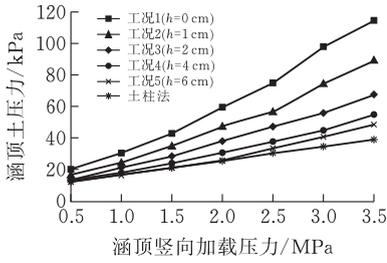
图4 应力—应变关系图

## 2 试验结果及分析

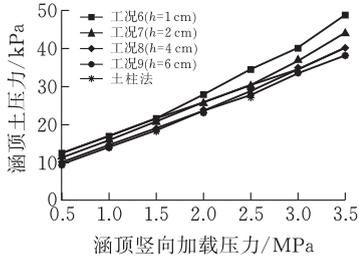
### 2.1 EPS板厚度的影响

涵顶铺设密度  $\rho$  为25 kg/m<sup>3</sup>和12 kg/m<sup>3</sup>的 EPS板时,测得工况1-9涵顶土压力如图5所示。

由图5a可以看出,随着竖向荷载的增加,涵顶土压力呈非线性递增,且递增幅度逐渐增加。当竖向荷载为3.5 MPa时,测得工况1-5的涵顶土压力分别为115.1 kPa、89.4 kPa、67.7 kPa、55.2 kPa和49.1 kPa,较未铺设 EPS板的涵顶土压力分别减少了22.3%、41.2%、52.0%和57.3%。表明随着 EPS板厚度的增加,其涵顶土压力减载率逐渐增大,但减



(a)  $\rho = 25 \text{ kg/m}^3$



(b)  $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$

图 5 涵顶土压力变化图

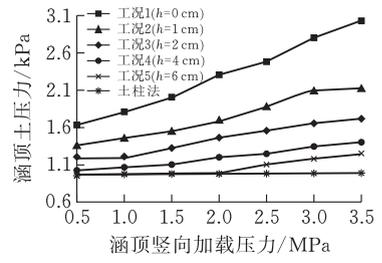
小幅度逐渐减少,尤其是工况 4 和工况 5,在 EPS 板厚为 4~6 cm 时,涵顶土压力相差不大,EPS 板减载效果存在一定的限制。随着竖向荷载增加,实际传递到涵顶上的土压力仍然较大,对比未铺设 EPS 时,涵顶土压力远大于铺设 EPS 板时的涵顶土压力,但实测工况 2~5 的涵顶土压力值仍略大于理论值( $\sigma = \gamma H$ )。此时,只考虑 EPS 板厚度对涵顶的减载作用具有局限性,柔性填料还不能起到的较好的减载效果。

当竖向荷载为 3.5 MPa 时,测得工况 6-9 的涵顶土压力分别为 48.9 kPa、44.1 kPa、40.1 kPa 和 38.4 kPa,较未铺设 EPS 板的涵顶土压力分别减少了 57.5%、61.7%、65.1% 和 65.7%。由图 5b 知,EPS 板的厚度改变引起涵顶土压力的变化规律与工况 2-5 基本一致,减载率均在 50% 以上,但减小幅度也是逐渐减少,工况 8 和工况 9 的涵顶减载率几乎相同,4~6 cm 厚 EPS 板减载效果几乎相同。

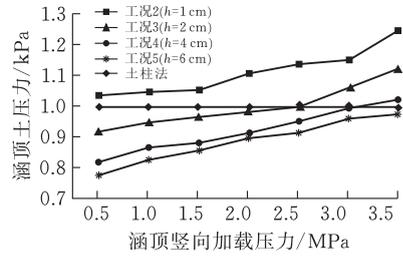
对比不同的 EPS 板厚,工况 1-9 涵顶土压力系数变化趋势如图 6 所示。

由图 6a 可知,涵顶土压力系数(实测值/理论值)随竖向荷载增加而增大,当  $1.0 \leq H/B \leq 3.4$  (涵洞高宽比)时,涵顶土压力系数的增大幅度呈递增趋势;当  $H/B \geq 3.4$  时,涵顶土压力系数增大幅度出现减缓趋势。采用 EPS 板减载后,当竖向荷载增加时,EPS 板厚为 4~6 cm 时,涵顶土压力系数在 0.97~1.38 之间,EPS 板厚为 6 cm(模拟填土高度  $H$  为 25.9 m)时,涵顶土压力系数小于 1,表明 EPS 板减载性能良好,能够对涵洞顶板起到在一定的卸载作用。

由图 6b 可以看出,涵顶土压力系数普遍偏小,



(a)  $\rho = 25 \text{ kg/m}^3$



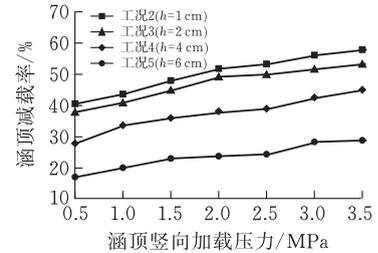
(b)  $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$

图 6 涵顶土压力系数变化图

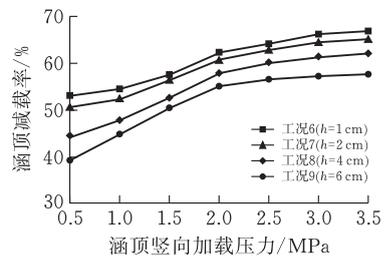
表明涵顶柔性填料的卸载效果有了明显的提升,涵顶土压力系数整体上随竖向荷载增加而增大,涵顶土压力系数保持在 0.77~1.24 之间。随着 EPS 板厚度的增加,涵顶土压力系数慢慢减小。而 EPS 板厚为 1 cm 时,涵顶土压力系数略微大于 1,EPS 的减载效果相对较弱;在 EPS 板厚为 2 cm 时,涵顶土压力系数在 1 上下浮动,EPS 良好的减载效果逐渐明显;EPS 板厚为 4~6 cm 时,涵顶土压力系数基本上小于 1,EPS 的减载效果突出,EPS 板的厚度在 4 cm 左右较为适宜。

### 2.2 EPS 板密度的影响

对比两种密度的 EPS 板,工况 2-9 涵顶土压力减载率如图 7 所示。



(a)  $\rho = 25 \text{ kg/m}^3$



(b)  $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$

图 7 涵顶减载率变化图

由图 7 可以看出,随着 EPS 板铺设厚度的增

加,涵顶减载率也随之增加。当分析 EPS 板密度影响时,工况 2~5 减载幅度明显缓于工况 6~9,且工况 6~9 减载率约为同等荷载下工况 2~5 的 1.1~1.58 倍。当竖向荷载增大,两种 EPS 板的减载效果有不同的发挥阶段,当采用密度  $\rho$  为  $25 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板时,减载率(相对于工况 1 时土压力的减小百分比)呈现持续的递增趋势;当采用密度  $\rho$  为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板时,减载率呈现先增大后平缓的变化过程。这种变化是 EPS 板在受挤压后,由于密度和厚度的差异,部分工况的 EPS 板从弹塑性阶段(图 40a、ab 段)开始向强化阶段(图 4bc 段)转移。分析 EPS 板厚度与减载率关系,对比工况 4、5、8、9 与工况 2、3、6、7 的涵顶土压力,前者减载率约为后者的 1.14~2.5 倍;同时,EPS 板随板厚的减载率幅度呈现先增后减的曲线变化,其中在工况 3、4 和工况 7、8(EPS 板厚为 2~4 cm)时,减载率跨度最大,减载效率最佳;在竖向荷载为 2 MPa(曲线斜率最大)处,减载效率提升幅度最大,涵顶土压力减载的效率也最高。同时也表明 EPS 板的厚度和密度对涵顶减载相互交叉影响,EPS 板的厚度和密度的合理选择是试验结果的重要因素。

为分析涵顶、涵侧的土压力分布情况,以竖向荷载为 2 MPa 为例,测得五种工况结果如图 8 所示。

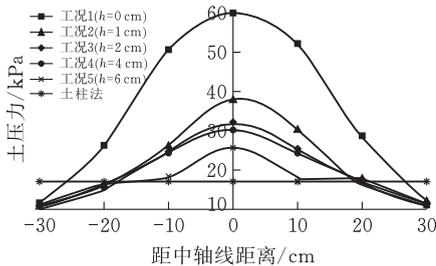


图 8 涵周土压力变化图

由图 8 可以看出, EPS 板对涵顶、涵侧的土压力的减载效果均非常明显,且在一定区域内(距中轴线  $0 \sim \pm 10 \text{ cm}$ ),两种密度的 EPS 板减载差异较大,工况 7、8 的应力约工况 3、4 的 80%,表明采用密度  $\rho$  为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板对涵洞周围土压力减载更佳。随着 EPS 板厚的增加,涵顶、涵侧(距中轴线  $0 \sim \pm 20 \text{ cm}$ )的土压力值仍大于理论值,但其与理论值之间的差值逐渐减小。涵侧(距中轴线  $\pm 20 \text{ cm} \sim \pm 30 \text{ cm}$ )的土压力变化幅度减小,五种工况的涵侧土压力值几乎不变化,且涵侧土压力系数小于 1。表明 EPS 板对涵周土压力影响较大,距涵洞越远 EPS 减载作用逐渐减弱直至消失。

为分析 EPS 板的密度对涵侧土压力的减载情况,以竖向荷载为 2 MPa 和 2 cm、4 cm 的 EPS 板厚为例,测得结果如图 9 所示。

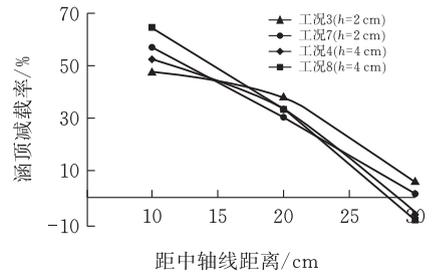


图 9 涵侧减载率变化图

由于涵洞结构对称,故可分析一侧应力变化。由图 9 可以看出,离涵洞中轴线越近(距中轴线  $0 \sim \pm 10 \text{ cm}$ ),涵侧土压力减载效果随 EPS 板的厚度增加而提升,减载率维持在 50% 以上,其中工况 7、8 比工况 3、4 减载率约高 10%,密度为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板减载效果更佳;离中轴线越远(距中轴线  $\pm 10 \text{ cm} \sim \pm 20 \text{ cm}$ ),涵侧土压力减载效果随 EPS 板厚度的增加反而有所降低,减载率均低于 35%,两种密度的 EPS 板减载效果相差不大;离涵顶轴线越远(距中轴线  $\geq \pm 20 \text{ cm}$ ),减载率越低甚至工况 4、8 时为负值,密度为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板对涵侧土压力有增大的影响。

当 EPS 板密度较小时,涵侧土压力的减载率随距中轴线距离的增大而急剧减小;当 EPS 板密度较大时,涵侧土压力的减载率变化趋势与前者相同,但曲线变化幅度稍微缓和。综合考虑到减小涵顶土压力的目的,在相同的 EPS 板厚时,采用密度为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板减载效果更佳。

### 2.3 对比两层土压力的应力变化

为分析两层土压力分布情况,以竖向荷载为 3.5 MPa,密度  $\rho$  为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板为例,测得工况 1、7、8 结果如图 10 所示。

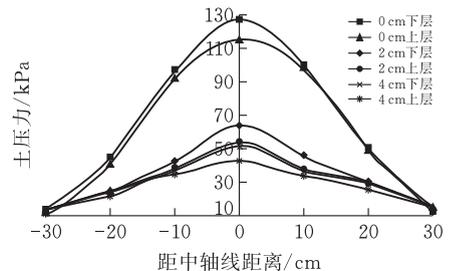


图 10 涵周土压力变化图

由图 10 可以看出,上下层涵顶、涵侧的土压力分布规律大致走势相同,在工况 1(未铺设 EPS 板)中的涵顶、涵侧的土压力均为下层应力值大于上层应力值,呈现一般的应力分布规律;在工况 7、8 中涵周(距中轴线  $0 \sim \pm 20 \text{ cm}$ )的土压力下层应力值小于上层应力值,且离涵洞中轴线越近,上下层土压力差值越大,涵侧(距中轴线  $\geq \pm 20 \text{ cm}$ )的土压力较工况 1 应力值增大, EPS 反而起到增荷的影响,其变化

规律与 EPS 板密度和厚度引起的复杂受力情况有关。其原因为:当在涵顶铺设 EPS 板后,在竖向荷载作用下,其压缩变形量较大,减少了内外土柱的沉降差,涵顶上方产生向上的“土拱效应”,使得涵顶土压力向涵侧土体发生应力扩散,达到涵洞顶部卸载的目的。

### 3 结论

本文在室内模型试验成果基础上,探讨了 EPS 板作为涵洞常见的减载填料,其减载效果主要与 EPS 板厚度和密度有密切联系,得出如下结论:

1)只考虑 EPS 板厚度对涵顶的减载仍然具有局限性,柔性填料不会起到明显的减载效果,在 EPS 板厚为 2 cm 时,EPS 良好的减载效果逐渐明显;EPS 板厚为 4~6 cm 时,EPS 的减载效果突出,EPS 板的厚度在 4 cm 左右较为适宜。

2)当 EPS 板密度从  $25 \text{ kg/m}^3$  变为  $12 \text{ kg/m}^3$  时,涵顶土压力系数减小 1.2 倍左右,在竖向荷载为 2 MPa 处,减载效率提升幅度最大,且 EPS 板厚为 2~4 cm 时,涵顶土压力的减载效率最高。

3)EPS 板对涵侧土压力的减载效果并不明显,考虑到减小涵顶土压力的目的,在相同的 EPS 板厚时,采用密度为  $12 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板减载效果更佳。同时表明 EPS 板的厚度和密度对涵顶土压力减载效果相互交叉影响,EPS 板的厚度和密度的合理选择是试验结果的重要因素。

### [参 考 文 献]

- [1] Kang J, Parker F, Chai H Y. Soil - structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes Part I: Embankment installation[J]. Engineering Structures, 2008; 30(2):384-392.
- [2] 陈保国, 宋丁豹, 王云辉, 等. 减载式刚性涵洞减载机理与受力特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):79-84.
- [3] 刘凯, 向先超, 范志强, 等. 上埋式涵洞竖向土压力计算的新方法[J]. 人民黄河, 2018, 40(6):109-115.
- [4] 康佐, 杨晓华, 谢永利, 等. 高填路堤下涵洞病害机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(2):22-26.
- [5] 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.
- [6] 郭婷婷. EPS 板在上埋式涵洞土压力减荷中的应用与分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(1):74-78.
- [7] 顾安全, 吕镇锋, 姜峰林, 等. 高填土盖板涵 EPS 板减荷试验及设计方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1481-1486.
- [8] Vaslestad J, Yesuf G Y, Johansen T H. Long-term in-situ measurements of concrete culverts with high fills [C]// Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 8th International Conference (BCR2A09). 2009.
- [9] Sun L, Hopkins T C, Beckham T L. Long-term monitoring of culvert load reduction using an imperfect ditch backfilled with geofoam[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2212(1):56-64.

## Load Reduction Model Test of High Fill Rigid Culvert with EPS Plate

DENG Qian<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>1</sup>, HU Gang<sup>2</sup>, DONG Heming<sup>2</sup>

(1 School of Civil Engin.and Architecture, Hubei Univ.of Tech., Wuhan 430068, China ;

2 Shiyuan Transportation Investment Co. LTD., Shiyuan 442000, China )

**Abstract:** In order to determine the relationship between the load reduction effect of EPS plate and the density and thickness of the material, a large-scale indoor model test was carried out on the basis of the load reduction characteristics of flexible filler. The effect of EPS plate with thickness of 0, 1 cm, 2 cm, 4 cm and 6 cm, density of  $12 \text{ kg/m}^3$  and  $25 \text{ kg/m}^3$  on culvert top and culvert side has been examined. The mechanism of earth pressure distribution is also analyzed. The test results show that there are limitations on the load reduction of culvert roof if only the thickness of EPS plate is considered; the load reduction effect of using the density of  $12 \text{ kg/m}^3$  is better when the same thickness of EPS plate is applied; the load reduction efficiency of earth pressure on culvert top comes to the highest in the vertical load of 2 MPa and the thickness of 4 cm. The results also reveal that the thickness and density of EPS plate have a cross-influence on the earth pressure reduction effect of the crown of culvert. The reasonable choice of thickness and density of EPS board is an important factor in the test results.

**Keywords:** high fill culvert; earth pressure; EPS load shedding; thickness; density; load reduction ratio