

沉管隧道卵石与碎石垫层力学变形特性对比研究

王 勇^{1,2}, 穆清君³, 过 超⁴, 付佰勇⁴, 何 潇⁴

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;
3. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430000; 4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088)

摘 要: 国内外沉管隧道先铺基础多采用碎石作为垫层材料, 目前尚无采用卵石的先例。卵石和碎石在表面光滑度、排列接触方式、颗粒间天然空隙率等物理特性的差异性将影响其力学性能表现。通过物理模型试验和数值模拟计算, 对卵石和碎石垫层的力学变形特性进行对比分析。研究表明: (1) 两种材料垫层压缩曲线均呈两阶段反弯曲线变化趋势, 相同荷载条件下卵石垫层压缩量较碎石高, 总体割线模量较碎石低约30%。(2) 垫层厚度由0.8 m变为1 m时, 卵石垫层割线模量增加了13.0%, 碎石垫层割线模量增加了2.2%; 卵石垫层力学变形性能对垫层厚度的变化较碎石垫层更敏感。(3) 预压荷载由52.5 kPa增加到84 kPa时, 卵石垫层割线模量增加了23.5%, 碎石垫层割线模量增加了7.6%; 预压荷载越大, 卵石垫层能更早达到拐点从而表现出更稳定的力学性能; 增加预压荷载对卵石垫层整体力学变形性能的改善较碎石垫层更明显。(4) 随沟宽增大, 垫层模量在前期再压缩阶段出现模量提高, 而在全加载期内总体表现为模量降低; 在全荷载范围内卵石垫层对垫层尺寸变化的敏感度低于碎石垫层。(5) 碎石垫层的整体力学性能优于卵石垫层, 但两种垫层材料对结构沉降和受力状态的影响相对有限; 在对施工偏差敏感度充分分析的基础上, 卵石可替代碎石作为沉管隧道垫层材料。(6) 开展卵石级配试验研究, 获取最佳卵石级配, 是未来研究方向。

关 键 词: 沉管隧道; 卵石垫层; 碎石垫层; 力学; 变形

中图分类号: U 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)10-3425-07

Comparative study on the mechanical deformation characteristics of pebble and gravel cushion in immersed tube tunnel

WANG Yong^{1,2}, MU Qing-jun³, GUO Chao⁴, FU Bai-yong⁴, HE Xiao⁴

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd, Beijing 100088, China;
3. CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;
4. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Gravel was widely applied as the cushion materials for most foundations of the immersed tunnels, while the pebble as an alternative material has not been used till now. The differences in physical characteristics such as surface smoothness, alignment, contact methods and natural porosity between the gravel and pebble will affect its mechanical performance. In this paper, the mechanical deformation characteristics of pebble and gravel cushion were comparatively studied through physical modelling tests and numerical simulations. The results show that: 1) The compression curves of the two material cushions both show a two-phase anti-bending trend. The compression of pebble cushions is higher than that of the gravel under the same loading condition, whereas the overall secant modulus of pebble is approximately 30% lower than that of the gravel. 2) When the thickness of the cushion increases from 0.8 m to 1 m, a 13% increase in the secant modulus for the pebble cushion is observed, while 2.2% for the gravel. The mechanical deformation properties of the pebble cushion are more prone to be influenced by the cushion thickness than the gravel cushion. 3) When the preload increases from 52.5 kPa to 84 kPa, the secant modulus of the pebble cushion increases by 23.5%, while the modulus of the gravel cushion increases by merely 7.6%. A larger preload load leads to an earlier inflection point for the pebble cushion so as to show more stable mechanical properties. The increase in the preload load can more significantly improve the overall mechanical deformation performance for the pebble cushion than for the gravel cushion. 4) As the ditch width increases, the secant moduli of both cushions decrease. The pebble cushion is less sensitive to the changes in ditch size than the gravel cushion in the full load range. 5) The performance of the overall mechanical properties of the gravel cushion are better than the pebble cushion, but the cushion materials have limited effects on the structural settlement and stress. The pebble material can be used as an alternative cushion material for the immersed tunnels after a full analysis of the sensitivity to construction deviation. 6) Investigations on the optimal pebble grading will be the priority in the follow-up study.

Keywords: immersed tube tunnel; pebble cushion; gravel cushion; dynamics; deformation

1 引言

沉管隧道基础垫层起着为隧道结构提供平整基础、控制沉降、改善结构受力的重要作用,通常分为先铺刮石法和后铺压砂(浆)法两种施工工艺^[1-2]。先铺法垫层以其可控可检性好、工效高等优点,在越来越多的沉管隧道中得到应用。厄勒海峡隧道、韩国釜山隧道、港珠澳沉管隧道、深中通道沉管隧道等均采用先铺法垫层基础,且均以碎石作为垫层材料。卵石作为内河中游区基槽开挖时较易于获取的工程材料,若将其用作沉管先铺垫层材料,则在经济性上具有较大优势,但国内外沉管隧道尚无采用卵石垫层的工程先例。

张志刚等^[3]对港珠澳大桥沉管隧道基础垫层选型和设计方案进行了分析;王勇^[4]结合港珠澳大桥沉管隧道基础垫层技术方案,通过物理模型试验分析了碎石级配、垄沟尺寸、施工偏位等对碎石垫层变形特性的影响;田建勃等^[5]通过试验研究、数值计算分析了垫层厚度对垫层性能的影响,并提出碎石垫层呈现越压越密的特性;刘亚平等^[6]通过深水地基载荷试验,总结出试验总沉降主要产生于碎石垫层的瞬时沉降;李景^[7]、史兴浩^[8]等针对溜管预压工况进行了垫层回弹再压缩问题研究。国内外学者针对沉管先铺垫层力学特性做了部分研究,但主要针对碎石材料,目前尚鲜见针对卵石垫层的相关研究。

卵石和碎石在表面光滑度、排列接触方式、天然空隙率等物理特性的差异性将影响其力学性能表现。因此,对卵石垫层和碎石垫层力学变形特性进行对比研究,为垫层材料选型和基础设计提供依据,是沉管隧道工程中需慎重研究解决的问题。本文以襄阳汉江沉管隧道为背景,通过物理模型试验和数值模拟计算,对比分析卵石、碎石垫层在不同工况下的变形特性及对沉管隧道结构的影响,给出两种材料的技术特点和适用条件,以指导类似沉管隧道基础垫层设计。

2 工程概况

襄阳汉江沉管隧道全长 5 400 m,其中西汉沉管段长 351 m,设置 4 个长度 86.5 m 管节,东汉沉管段长 660 m,设置 4 个长度 120.5 m 和 2 个长度 86.5 m 管节,沉管隧道纵断面见图 1。沉管采用两孔一管廊矩形钢筋混凝土结构;结构总宽 31.2 m,

总高 9.2 m,沉管结构及基础横断面见图 2。

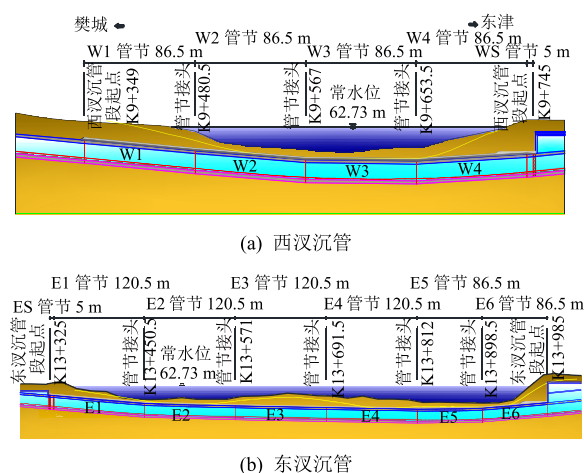


图 1 沉管隧道纵断面

Fig.1 Longitudinal section of the immersed tunnel

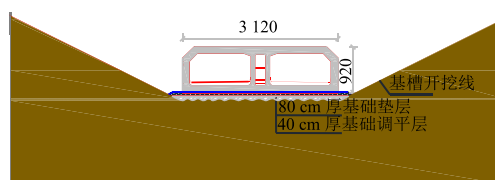


图 2 沉管结构及基础横断面 (单位: cm)

Fig.2 Cross section of the immersed tunnel and the foundation (unit: cm)

本项目隧道沉管段所处地层主要为细砂、卵石、圆砾,地层密实性好、压缩性低、承载力高,沉管基础垫层采用先铺法。沉管基础垫层采用设置 V 形槽的垄沟条带形式,平面 S 型铺设,纵断面呈锯齿形,厚度为 0.8 m。单垄顶纵向宽度为 1.2 m, V 形槽顶纵向宽度为 0.6 m。垫层铺设采用溜管工艺,同时通过管内石柱进行垫层预压。基础垫层布置见图 3、4。

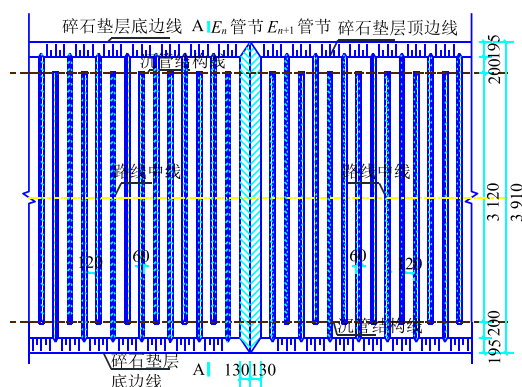


图 3 基础垫层平面布置 (单位: cm)

Fig.3 Plane layout of the pebble cushion (unit: cm)

偏差敏感度系数,以评价某特定因素对评价指标的影响。偏差敏感度系数计算式为

$$C = \frac{|\Delta F|}{|\Delta A|} \quad (2)$$

式中: C 为偏差敏感度系数; ΔA 为特定因素的变化率(%); ΔF 为评价指标的变化率(%)。

C 值越大说明评价指标对某特定因素偏差变化的敏感度越高。

4.1 卵石、碎石垫层试验曲线对比

试验中通过对垫层多级加载,获取数据并绘制标准工况 A 下碎石和卵石垫层荷载-变形压缩曲线,如图 8 所示。

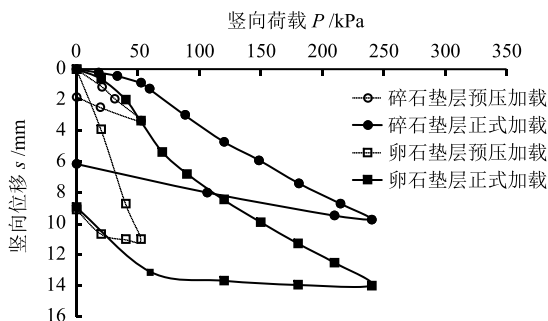


图 8 标准工况 A 压缩曲线
Fig.8 Compression curves under condition A

由图 8 可知,工况 A 条件下两种材料垫层的压缩曲线均符合土体压缩变形趋势的一般规律。两种材料的正式加载压缩曲线均呈两阶段反弯曲线变化趋势;两种材料后期阶段均呈现越压越密、沉降趋缓的特性,卸载后试样均出现一定回弹。

不论预压阶段还是正式加载阶段,相同荷载作用下,卵石垫层的压缩变形量均大于碎石垫层。标准工况正式加载阶段,卵石和碎石垫层的模量对比如表 2 所示。

表 2 标准工况正式加载阶段模量对比表
Table 2 Modulus comparison table of standard working condition in formal loading stage

材料	0~240 kPa 割线模量/MPa	0~52.5 kPa 再压缩模量/MPa	52.5~240 kPa 压缩模量/MPa
卵石	13.73	12.42	14.15
碎石	19.73	46.51	16.99

由表 2 可知,卵石垫层相较碎石垫层的割线模量低 30.4%,再压缩模量低 73.3%,压缩模量低 16.7%。分析认为,卵石没有棱角、表面光滑度高,使其颗粒间以点接触为主、摩擦阻力较小,需要颗

粒间更密实的接触排列才能实现受力平衡,从而造成相同荷载条件下卵石压缩量较碎石高。

4.2 厚度对卵石、碎石垫层的影响

卵石、碎石垫层厚度分别为 0.8 m (A 工况)、1 m (B 工况) 时的压缩曲线如图 9 所示。

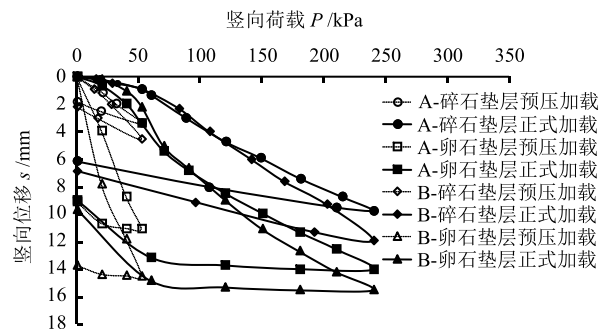


图 9 厚度为 0.8、1 m 的垫层压缩曲线
Fig.9 Compression curves of the cushion with thicknesses of 0.8 m and 1 m

由图 9 可知,垫层厚度变化时,两种垫层材料压缩曲线的变化规律基本一致,随垫层厚度增加,垫层压缩量略减。其模量变化及偏差敏感度系数如表 3、4 所示。

表 3 不同垫层厚度的垫层模量
Table 3 Moduli of the cushion with different cushion thicknesses

试验材料	0~240 kPa 割线模量/MPa		0~52.5 kPa 再压缩模量/MPa		52.5~240 kPa 压缩模量/MPa	
	0.8 m	1.0 m	0.8 m	1.0 m	0.8 m	1.0 m
卵石	13.73	15.51	12.42	24.31	14.15	14.08
碎石	19.73	20.17	46.51	57.95	16.99	17.05

表 4 垫层厚度偏差敏感度系数
Table 4 Sensitivity coefficients of the thickness deviation

试验材料	各模量评价指标对应的偏差敏感度系数		
	0~240 kPa 割线模量	0~52.5 kPa 再压缩模量	52.5~240 kPa 压缩模量
卵石	0.52	3.83	0.019
碎石	0.09	0.98	0.014

由表 3 可知,垫层厚度由 0.8 m 变为 1 m 时,卵石垫层割线模量增加了 13.0%,碎石垫层割线模量增加了 2.2%;卵石垫层的各模量均小于碎石垫层。由表 4 可知,卵石垫层各模量的偏差敏感度系数均大于碎石垫层,即卵石垫层的力学变形性能对垫层厚度的变化较碎石垫层更敏感,采用卵石作为垫层材料时应加大对垫层厚度施工偏差的控制。

4.3 预压荷载对卵石、碎石垫层的影响

预压荷载分别为 52.5 kPa (A 工况)、84 kPa (C 工况) 时的压缩曲线如图 10 所示。

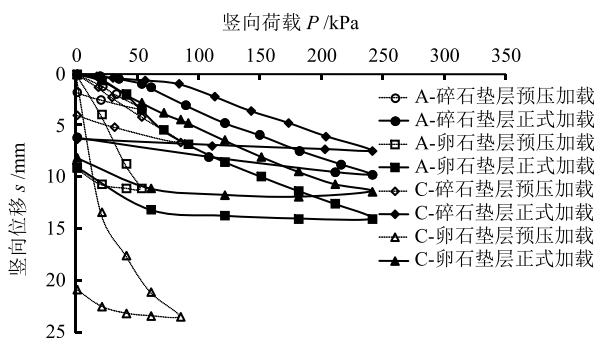


图 10 预压荷载 52.5、84 kPa 的垫层压缩曲线

Fig.10 Compression curves of cushion under preloads of 52.5 kPa and 84 kPa

由图 10 可知,预压荷载对降低垫层初期加载沉降和总沉降,提高垫层整体刚度作用明显。此外,随着预压荷载增大,碎石垫层曲线拐点出现位置与预压荷载值基本保持一致,而卵石垫层曲线拐点由标准工况的 52.5 kPa 提前至 20 kPa 处。分析认为,预压荷载越大,卵石颗粒间克服摩擦阻力形成的新排列接触相比碎石越稳定,卸载回弹比越小,因此,在再次加载时卵石垫层能更早达到拐点从而表现出更稳定的力学性能。不同预压荷载的垫层模量变化及偏差敏感系数如表 5、6 所示。

表 5 不同预压荷载的垫层模量

Table 5 Moduli of cushion under different preloads

试验材料	0~240 kPa		0~预压荷载		预压荷载~240 kPa	
	割线模量/MPa		再压缩模量/MPa		压缩模量/MPa	
	52.5 kPa	84 kPa	52.5 kPa	84 kPa	52.5 kPa	84 kPa
卵石	13.73	16.95	12.42	15.17	14.15	18.09
碎石	19.73	21.22	46.51	69.60	16.99	19.43

表 6 预压荷载偏差敏感系数

Table 6 Sensitivity coefficient of preload deviation

试验材料	各模量评价指标对应的偏差敏感系数		
	0~240 kPa	0~预压荷载	预压荷载~240 kPa
	割线模量	再压缩模量	压缩模量
卵石	0.39	0.36	0.46
碎石	0.13	0.83	0.14

由表 5 可知,预压荷载越大,垫层各阶段模量均越大,预压荷载由 52.5 kPa 增加到 84 kPa 时,卵石垫层割线模量增加了 23.5%,碎石垫层割线模量增加了 7.6%。由表 6 可知,卵石垫层全过程割线模

量的偏差敏感系数高于碎石垫层,即增加预压荷载对卵石垫层整体力学变形性能的改善更明显。

4.4 堑沟尺寸对卵石、碎石垫层的影响

卵石垫层、碎石垫层堑沟尺寸分别为 0.6 m (A 工况)、0.8 m (D 工况) 时的压缩曲线如图 11 所示。

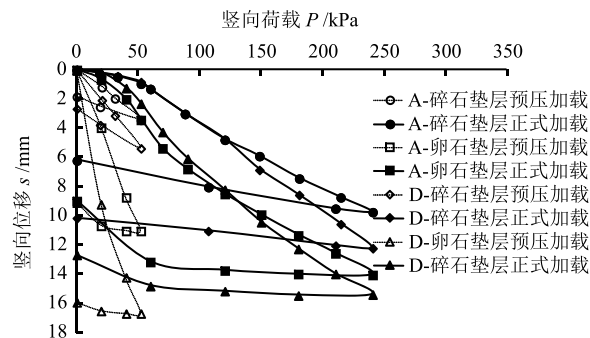


图 11 堑沟尺寸 0.6、0.8 m 的垫层压缩曲线

Fig.11 Compression curves of cushion with ditch sizes of 0.6 m and 0.8 m

由图 11 可知,外荷载作用下两种堑沟尺寸垫层压缩变形趋势基本一致,随沟宽增加,垫层沉降量总体呈加大趋势。不同堑沟尺寸的垫层模量及偏差敏感系数如表 7、8 所示。

表 7 不同堑沟尺寸的垫层模量

Table 7 Moduli of cushion with different ditch sizes

试验材料	0~240 kPa		0~52.5 kPa		52.5~240 kPa	
	割线模量/MPa		再压缩模量/MPa		压缩模量/MPa	
	0.6 m	0.8 m	0.6 m	0.8 m	0.6 m	0.8 m
卵石	13.73	12.51	12.42	13.2	14.15	12.24
碎石	19.73	15.76	46.51	50.6	16.99	13.22

表 8 堑沟尺寸偏差敏感系数

Table 8 Sensitivity coefficient of ditch size deviation

试验材料	各模量评价指标对应的偏差敏感系数		
	0~240 kPa	0~52.5 kPa	52.5~240 kPa
	割线模量	再压缩模量	压缩模量
卵石	0.27	0.19	0.40
碎石	0.60	0.26	0.67

由表 7 可知,随沟宽加大,垫层模量在前期再压缩阶段出现模量提高,而在全加载期内总体体现为模量降低;相同条件下卵石垫层的模量均小于碎石垫层。分析认为,在预压阶段,沟宽加大使堑上的预压荷载集度加大,等同于加大预压荷载;在再压缩阶段,垫层沉降变形较小,堑上较大的预压荷载使再压缩模量出现提高趋势;随着后续加载,沟宽加大使堑上卵(碎)石所受侧向约束减弱成主导因素,造成模量总体降低。由表 8 可知,卵石垫层

各阶段模量的偏差敏感度系数低于碎石垫层。分析认为,这与预压后卵石垫层更密实稳定的特性相关,加大垄沟不会引起卵石模量的过大降低。

5 两种垫层材料对沉管结构影响分析

隧道基础垫层的作用是改善沉管隧道结构受力。基于试验获取的各阶段垫层材料模量,结合襄阳汉江东汉沉管典型断面建立有限元模型,采用二维数值分析模拟施工过程,进一步分析卵石、碎石两种垫层材料对隧道结构的影响。

5.1 计算模型

土体和垫层材料模型均采用 HS 模型,土体材料参数依据地勘报告参数取值,卵石和碎石垫层材料参数结合本次试验结论确定,具体材料参数详见表 9。表中 E_{50} 为三轴排水试验割线刚度, E_{oed} 为侧限压缩试验切线刚度, E_{ur} 为卸载/重加载刚度。

表 9 土体及垫层材料参数

Table 9 Parameters of the soil and cushion materials

土层名称	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	摩擦角 ($^{\circ}$)	模量		
				E_{50} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{ur} (MPa)
中砂	19.8	0	27	18.00	18.00	54.00
圆砾	20.0	0	42	30.00	30.00	90.00
卵石混圆砾	20.5	0	42	45.00	45.00	135.00
回填碎石土	21.0	1	36	12.00	12.00	36.00
卵石垫层	20.0	0	42	14.15	14.15	28.30
碎石垫层	20.0	0	36	16.99	16.99	46.51

针对卵石垫层和碎石垫层两种情况,采用塑性计算,模拟从基槽开挖、垫层铺设到管节沉放、回填覆盖、通车运营的全过程。土层与结构计算模型如图 12 所示。

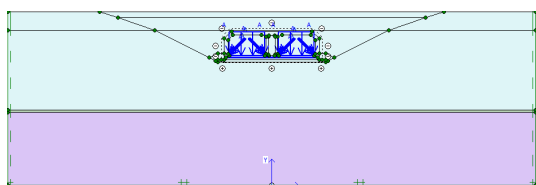


图 12 计算模型

Fig.12 Computational model

5.2 计算结果

垫层材料分别为卵石、碎石时沉管底板的沉降、弯矩对比曲线如图 13、14 所示。

由图 13 可知,卵石或碎石垫层的管底沉降曲线均呈马鞍型,由于卵石垫层各阶段模量均较碎石垫

层低,卵石垫层的管底最终沉降量较碎石垫层增大 2~4 mm。由图 14 可知,卵石垫层的底板平均弯矩为 $1\,132.5\text{ kN} \cdot \text{m}$,较碎石垫层的底板平均弯矩仅增加了 0.65%。上述分析表明,垫层材料对结构沉降和受力状态的影响相对有限,这也证明卵石可替代碎石作为沉管隧道垫层材料。

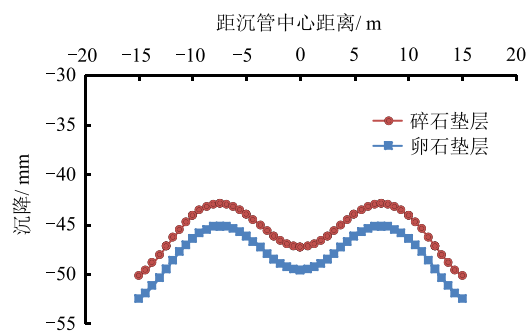


图 13 管底沉降对比曲线

Fig.13 Comparative curves of settlement

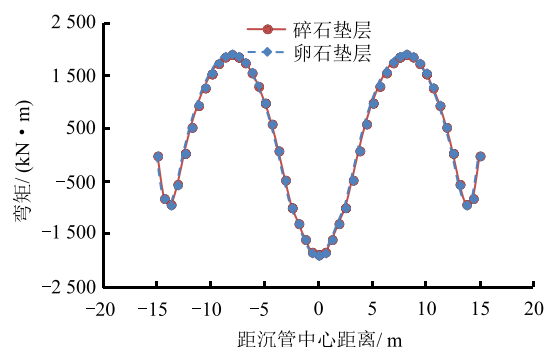


图 14 隧道底板弯矩对比曲线

Fig.14 Comparative curves of bending moment

6 结 论

本文基于物理模型试验和数值模拟计算对比分析了卵石垫层与碎石垫层的力学变形特性,结果表明:

(1) 两种材料垫层的压缩曲线均符合土体压缩变形趋势的一般规律,正式加载压缩曲线均呈两阶段反弯曲线变化趋势,两种材料在后期阶段均呈现越压越密、沉降趋缓的特性。卵石垫层受卵石没有棱角、表面光滑度高、颗粒间点接触为主等物理特性影响,相同荷载条件下其压缩量较碎石高,总体割线模量较碎石低约 30%。

(2) 垫层厚度由 0.8 m 变为 1 m 时,卵石垫层割线模量增加了 13.0%,碎石垫层割线模量增加了 2.2%。卵石垫层的力学变形性能对垫层厚度的变化较碎石垫层更敏感,采用卵石作为垫层材料时应加大对垫层厚度施工偏差控制的关注。

(3) 预压荷载对降低垫层初期加载沉降和总沉降, 提高垫层整体刚度有明显作用。预压荷载由 52.5 kPa 增加到 84 kPa 时, 卵石垫层割线模量增加了 23.5%, 碎石垫层割线模量增加了 7.6%。预压荷载越大, 卵石颗粒间克服摩擦阻力形成的新排列相比碎石越稳定, 在再次加载时卵石垫层能更早达到拐点从而表现出更稳定的力学性能。卵石垫层的力学变形性能对预压荷载的变化更敏感、依赖性更强, 施工中保持较高的预压荷载有利于卵石垫层发挥更好的力学性能。

(4) 随沟宽增大, 两种材料垫层的总体模量均减小。在全荷载范围内, 卵石垫层对垄沟尺寸变化的敏感度低于碎石垫层, 卵石垫层可更好地适应垄沟尺寸施工偏差带来的不利影响。

(5) 由数值分析结果可知, 虽然碎石垫层的整体力学性能优于卵石垫层, 但两种垫层材料对沉管结构沉降和受力状态的影响相对有限。在对施工偏差敏感度充分分析的基础上, 卵石可替代碎石作为沉管隧道垫层材料。

(6) 鉴于卵石独特的物理特性, 若采用更合理的粒径级配, 将能更有效地发挥卵石垫层压载后易于稳定的特性, 改善其压缩模量。开展卵石级配试验研究, 获取最佳卵石级配, 是未来研究方向。

参 考 文 献

- [1] 冯海暴, 苏长玺. 沉管隧道基础处理方法研究分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 33-38.
FENG Hai-bao, SU Chang-xi. Research and analysis on treatment methods of immersed tube tunnel foundation[J]. **Modern Tunnel Technology**, 2019, 56(1): 33-38.
- [2] 任耀谱. 襄阳汉江沉管隧道基础设计[J]. 中国水运, 2019(6): 107-109.
REN Yao-pu. Foundation design of submerged tube tunnel for Xiangyang Hanjiang River[J]. **China Water Transport**, 2019(6): 107-109.
- [3] 张志刚, 付佰勇, 刘晓东, 等. 港珠澳大桥海底沉管隧道基础垫层选型与总体设计[J]. 中国港湾建设, 2018(38): 34-38.
ZHANG Zhi-gang, FU Bai-yong, LIU Xiao-dong, et al. General design and type selection of foundation bedding of undersea IMT for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. **China Harbour Engineering**, 2018(38): 34-38.
- [4] 王勇. 深埋沉管隧道基础碎石垫层变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3387-3392.
WANG Yong. Experimental study on deformation characteristics of gravel cushion of deep IMT foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3387-3392.
- [5] 田建勃, 韩晓雷, 于清桦, 等. 碎石垫层强度与变形特性试验研究和有限元分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 83-89.
TIAN Jian-bo, HAN Xiao-lei, YU Qing-hua, et al. Experimental study and finite element analysis of strength and deformation characteristics of gravel cushion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 83-89.
- [6] 刘亚平, 胥新伟, 魏红波, 等. 港珠澳大桥深水地基载荷试验技术[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 480-485.
LIU Ya-ping, XU Xin-wei, WEI Hong-bo, et al. Load test technique for deep water foundation of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl. 2): 480-485.
- [7] 李景. 外海大回淤沉管隧道地基回弹再压缩机理与特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
LI Jing. Study on the mechanism and characteristics of rebound and recompression of foundation of offshore large siltation IMT[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [8] 史兴浩, 谢远. 沉管隧道地基回弹与再压缩计算分析[J]. 河南城建学院学报, 2017, 26(6): 26-30.
SHI Xing-hao, XIE Yuan. Calculation and analysis of foundation rebound and recompression of IMT[J]. **Journal of Henan Urban Construction College**, 2017, 26(6): 26-30.
- [9] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China Academy of Building Research. GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.