

DOI: 10.11779/CJGE201404011

# 边载作用下隔离桩隔离效果的影响因素研究

竺明星<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 龚维明<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:**以港珠澳大桥海底沉管隧道基础沉降控制研究为科研背景, 为研究岛头边载作用下隔离桩隔离效果的影响因素, 进行了8组室内模型试验, 分别研究了隔离桩桩长、桩径、桩间距及隔离桩距减沉桩距离 $S_1$ 等因素对隔离效果的影响。试验结果表明: 减沉桩桩身最大轴力、弯矩随隔离桩桩长的增加而减小, 并且当隔离桩桩长达到所需的嵌固深度时, 对弯矩的隔离效果非常显著; 隔离桩桩径的增加或桩间距的减小不仅提高隔离桩对竖向变形的阻断能力, 同时也使得隔离桩之间土拱效应增强, 减沉桩桩身最大轴力、弯矩随着隔离桩桩径的增加而减小, 随隔离桩桩间距的减小而减小, 同时, 当隔离桩桩间距达到 $8D$ 时, 对轴力与弯矩的隔离效果可以忽略不计; 减沉桩桩身最大轴力随 $S_1$ 的减小而减小, 而 $S_1$ 的变化对弯矩的隔离效果影响不显著; 研究成果可为隔离桩的应用提供较好的参考。

**关键词:** 隔离桩; 隔离效果; 边载作用; 影响因素

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)04-0671-09

**作者简介:** 竺明星(1985-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要从事桩基础理论和岩土工程数值分析方面的研究工作。E-mail: zmx198561@163.com。

## Factors influencing isolation effects of isolation piles under side loading

ZHU Ming-xing<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, GONG Wei-ming<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory for RC and PRC Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on the settlement control of the immersed tube tunnel in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, eight groups of laboratory model tests on length and diameter of piles, pile spacing and distance  $S_1$  between isolation piles and settlement reducing piles are performed to study the isolation effects of isolation piles under large side loading in the island edge. The results show that the maximum axial force and bending moment of settlement-reducing piles decrease with the increasing length of isolation piles, meanwhile a sufficient length of isolation piles plays a significant role in diminishing the bending moment. The increasing diameter of isolation piles or the decreasing spacing of isolated piles can enhance the obstructing ability of vertical deformation and strengthen the soil arching effect. The maximum axial force and bending moment of settlement-reducing piles decrease with the increasing diameter or the decreasing pile spacing. At the same time, the isolation effects for the axial force and moment can be ignored when the pile spacing reaches  $8D$ . The isolation effects for the axial force become better as distance  $S_1$  decreases, however those for the moment are not significant due to the variation of distance  $S_1$ . The research achievements may provide a better reference for the application of isolation piles.

**Key words:** isolation pile; isolation effect; side loading; influence factor

## 0 引言

在港口码头、桥梁基础、工业厂房建筑等工程中, 普遍存在堆载的现象。大面积堆载不仅会引起堆载范围内软土较大的沉降和水平侧移, 也会对邻近建筑物的桩基产生较大的影响因为堆载的作用而产生二次弯矩变形甚至使桩产生断裂破坏。为有效地保护堆载邻近建筑物基础, 隔离桩应运而生。

隔离桩是一种能够使邻近建筑物或堆载各自产生的地基附加应力隔开的构件, 减小地基附加应力的相

互重叠, 其设置能有效减少堆载对邻近建筑物的影响, 保护邻近建筑物的安全。

由于在隧道和地铁工程中的隔离桩工作机理较为复杂, 因此利用有限元软件进行数值模拟是一项较为常见的方法。刘芳等<sup>[1]</sup>使用大型有限元软件 ANSYS 对北京地铁 10 号线某段开挖断面进行了分析, 得到了

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAG07B01)

收稿日期: 2013-06-14

隔离桩水平变位曲线,表明隔离桩方案是安全的,可以起到一定防护作用。张冬梅等<sup>[2]</sup>以上海某大直径盾构越江隧道为工程背景,采用数值模拟方法分析了隧道不同施工阶段后建隧道对先建隧道的影响,并比较了有无隔离桩的条件下隧道的位移值,肯定了隔离桩在减小后建隧道对先建隧道的影响中起到的作用。闫静雅<sup>[3]</sup>、纪新博等<sup>[4]</sup>使用有限元软件 PLAXIS 计算分析了钻孔灌注桩施工对邻近隧道影响的工程中,采用了隔离桩的防护措施,分析不同隔离桩桩长、隧道与桩基础之间的距离、隔离桩桩数、隔离桩桩间距的因素并得出相关有益结论。

刘毓璁等<sup>[5]</sup>结合应力隔离桩与地基加固在大面积堆载条件下的软土地基处理中的联合工程实例,采用有限元分析了选定的深层搅拌桩挡墙+钻孔灌注桩方案,并得到了满足条件的安全系数和最大水平位移,实测数据表明,应力隔离与加固用于大面积堆载引起的邻近建筑物地基处理事故的应急处理效果显著。姚海波等<sup>[6]</sup>依托北京地铁 13 号线 14 标段施工中提出的导洞—隔离桩概念,分析施工过程中导洞—隔离桩结构体系的受力特点,最后将实测值与设计计算值进行了对比分析得出最终结论。隔离桩对于地表沉降控制较为明显,沉降在隔离桩内部较大,发展至隔离桩后迅速减小,这表明隔离桩限制了桩背后土体的移动,最大限度减小了隧道开挖对本区域外的影响。上述隔离桩的研究成果均采用有限元分析得到,而对于隔离桩的室内试验较为少见。

港珠澳大桥跨海工程中由于隧道暗埋段和岛头首末节沉管段的桩基础处于人工岛巨大岛头荷载的作用下,因管节对接对工期的要求,桩基础必须在大规模换填之前施工。为了有效降低岛头高边坡填土荷载对临近桩基础的影响,采用隔离桩方案,即在沉管下方桩基础两侧分别布置两排桩基础,用于保护沉管下方的桩基础,如图 1 所示为地基处理剖面示意图。本文以港珠澳大桥“长大深埋沉管隧道设计与施工关键技术及技术标准”课题为依托,采用室内模型试验对隔离桩隔离效果的影响因素进行分析研究。

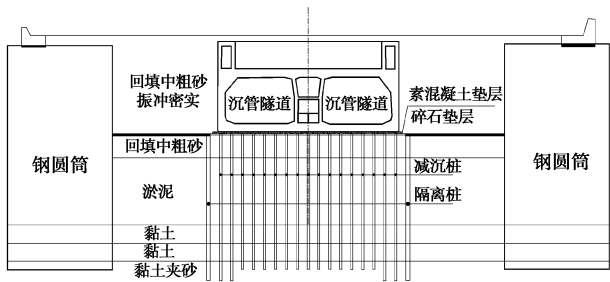


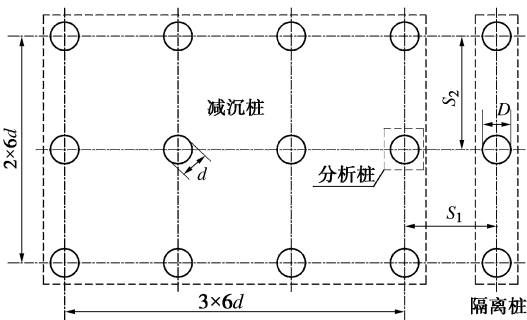
图 1 地基处理剖面图

Fig. 1 Sectional view of ground treatment

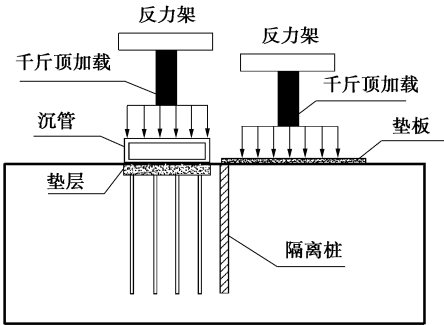
1 试验概况

1.1 试件设计

试验为了研究隔离受力特性及其隔离效果,制作了 8 组模型试件,试验模型布置如图 2 所示。



(a) 桩位布置示意图



(b) 荷载布置示意图

图 2 模型实验示意图

Fig. 2 Sketch map of model tests

如图 2 所示,模型桩均采用薄壁钢管模拟,壁厚均为 1.5 mm,减沉桩外径  $d=40$  mm,减沉桩长度均为 1.2 m。隔离桩长度分为 1.2, 1.6, 2.0 m 三组;桩径  $D$  有 40, 50, 60 mm 三组;桩间距  $S_2$  有 160, 240, 320 mm 三组;隔离桩距减沉桩最边缘  $S_1$  的距离有 240 mm 和 320 mm 两组。

由预试验实测得成品桩弹性模量约为  $E=216$  GPa。垫板为钢板,面积为  $1\text{ m}^2$ ,因厚度较厚,可近似认为垫板为刚性板。沉管采用 20 mm 厚的钢板进行拼焊。模型土选用细砂,厚度为 4 m,每填 30 cm 用 80 kg 的重力夯将土分层夯实,严格控制每层填土的高度与夯实后的高度,以保证砂土的均匀密实性。砂土密度为  $1.59\text{ g/cm}^3$ ,相对密度为 0.73,内摩擦角为  $26.3^\circ$ ,压缩模量为 222 MPa。

1.2 试验加载及量测

试验在  $3.0\text{ m}\times6.0\text{ m}\times4.5\text{ m}$  的混凝土试验槽中进行。与池壁相连的是钢反力架,反力架能提供 1500 kN 的反力,对池中的砂土不产生影响。通过钢反力架用电动油压千斤顶进行加载,加载值由精密油压表控

制。荷载施加采用慢速维持荷载法, 沉管顶部加载恒为 200 kPa, 先进行加载。隔离桩位置处加载定义为边载, 边载分为 8 级加载, 每级增加 25 kPa。长度为 1.2 m 的桩应变片布置在距桩顶分别为 50, 150, 300, 500, 750, 1000, 1150 mm 处。加载设备与装置如图 3 所示。



图3 土箱以及加载示意图

Fig. 3 Soil tank and sketch of loading system

2 试验结果及分析

减沉桩桩数较多, 试验时没有必要对所有减沉桩都进行测试分析, 只需对受影响最显著的减沉桩进行分析, 如图 2 (a) 所示的减沉桩中的分析桩为本文研究对象。

2.1 桩长影响分析

为了定量地研究隔离桩桩长对隔离效果的影响, 选择桩长为分别为 1.2, 1.6, 2.0 m 的隔离桩进行试验, 试验方案如表 1 所示。

表 1 桩长影响分析试验方案

Table 1 Test programs for influence of length of isolation piles				
试验组号	桩长/mm	D/mm	S <sub>1</sub> /mm	S <sub>2</sub> /mm
第①组	1200	40	240	240
第②组	1600	40	240	240
第③组	2000	40	240	240

(1) 轴力隔离效果分析

图 4 为隔离桩长分别为 1.2, 1.6, 2.0 m 时减沉桩轴力图, 图 5 为无隔离桩时减沉桩轴力图。从图 4, 5 中可看出, 在每级荷载下, 桩身轴力分布曲线形式基本类似: 从地表向下轴力随深度增加而增加, 在埋深

0.3 m 处轴力达到最大值, 然后随深度增加, 轴力呈逐渐减小趋势, 到桩尖位置轴力达到最小值; 随着边荷载等级提高, 桩身轴力整体均呈现增大的趋势。图 6 为第 8 级加载完成后减沉桩最大轴力随隔离桩桩长变化曲线图。由图 6 得: 设置长度为 1.2 m 隔离桩时减沉桩最大轴力减小约 9.84%; 隔离桩长度为 1.6 m 时减沉桩最大轴力减小约 18.03%; 隔离桩长度为 2.0 m 时减沉桩最大轴力减小约 23.50%。

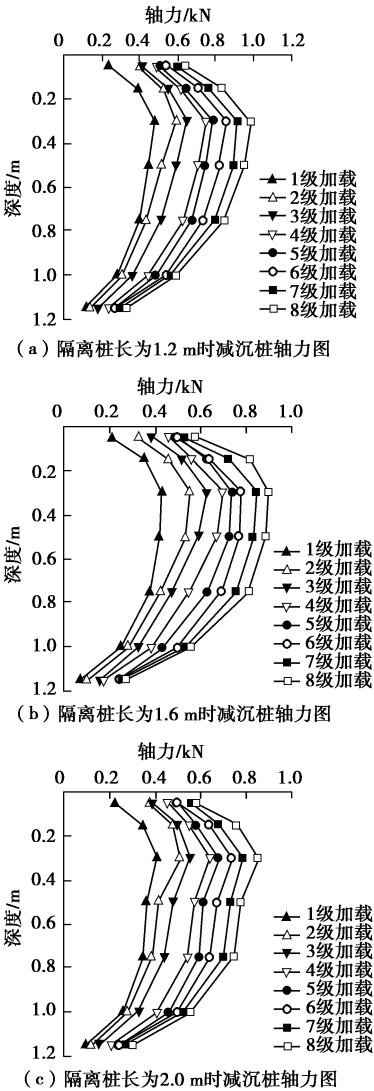


图 4 隔离桩桩长对轴力影响

Fig. 4 Influence of length of isolation piles on axial force

由于隔离桩良好的受力体系能够将承受的摩阻力进行纵向扩散, 将隔离桩内外竖向变形隔断, 减小隔离桩内外土体与构筑物的沉降。对比图 4, 5 中轴力关系可以发现由于隔离桩的存在首先降低了负摩阻力对桩的作用, 负摩阻力是由于预先加载产生, 由于隔离桩的存在降低了垫层与垫层下侧土体的沉降, 因而负摩阻力降低; 同时, 由于垫层沉降减小, 相应地, 垫层承担顶部荷载提高, 那么桩顶分担的荷载必然减小,

这就是有隔离桩时减沉桩桩身最大轴力比无隔离桩情况下要小的原因。

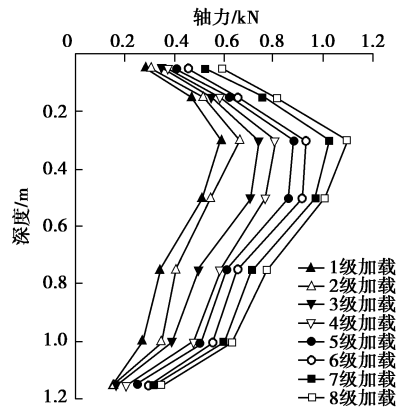


图 5 无隔离桩时轴力图

Fig. 5 Axial force without isolation piles

从图 6 可以看出,随着隔离桩桩长的增加,减沉桩桩身最大轴力逐渐减小。这是因为随着隔离桩长的增加,隔离桩承受的摩阻力也增加,隔断竖向变形的能力也增加;同时桩长增加进一步提高了隔离桩抵抗内侧土体水平变形能力。

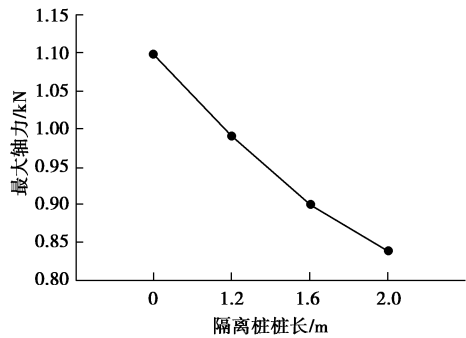


图 6 减沉桩最大轴力与隔离桩桩长关系

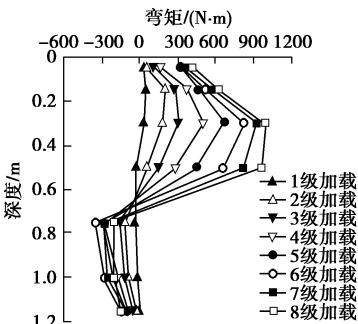
Fig. 6 Relation between maximum axial force of settlement-reducing piles and length of isolation piles

(2) 弯矩隔离效果分析

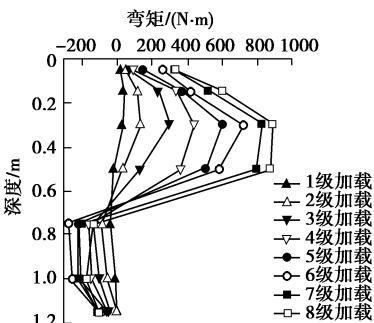
图 7 为隔离桩长分别为 1.2, 1.6, 2.0 m 时减沉桩桩身弯矩图,图 8 为无隔离桩时减沉桩桩身弯矩图,从图 7, 8 中可知:在每级荷载下,桩身弯矩分布曲线形式基本类似,从地表向下弯矩随深度增加而增加,到 0.3 m 处达到最大值;然后随深度增加而减小,到 0.6~0.7 m 左右弯矩为零;接着随深度增加反弯矩增大,到 0.75 m 处达到反弯矩最大值;最后随深度增加而减小,到桩尖处达到较小值。正弯矩部分随荷载等级提高而逐渐增加;负弯矩绝对值随荷载等级提高先增加,在第 6 级荷载时达到最大值,随后随着荷载等级增加而减小。

图 9 为第 8 级加载完成后减沉桩最大正弯矩随隔离桩桩长变化曲线图。由图 9 得:设置长度为 1.2 m

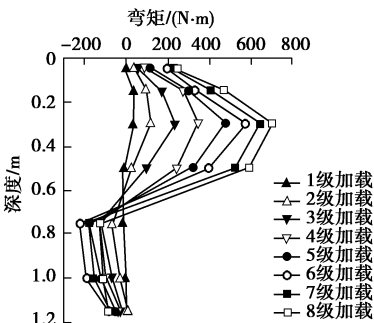
隔离桩时减沉桩最大弯矩减小约 21.71%;隔离桩长度为 1.6 m 时减沉桩最大弯矩减小约 29.82%;隔离桩长度为 2.0 m 时减沉桩最大弯矩减小约 44.20%。



(a) 隔离桩桩长为 1.2 m 时减沉桩弯矩图



(b) 隔离桩桩长为 1.6 m 时减沉桩弯矩图



(c) 隔离桩桩长为 2.0 m 时减沉桩弯矩图

图 7 隔离桩桩长对弯矩影响

Fig. 7 Influence of length of isolation piles on moment

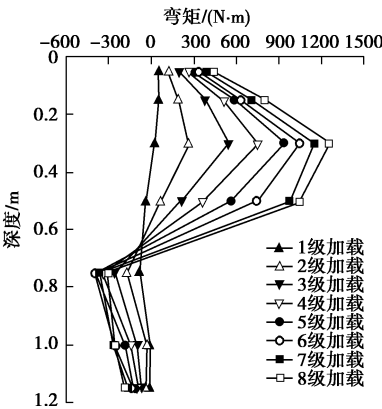


图 8 无隔离桩时弯矩

Fig. 8 Bending moment without isolation piles

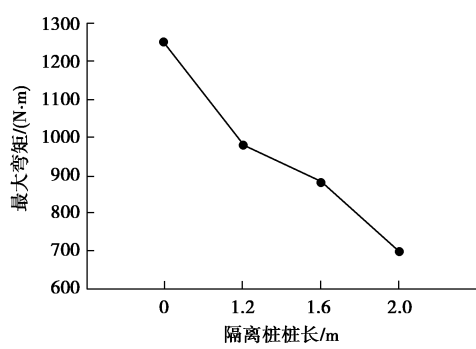


图 9 减沉桩最大弯矩与隔离桩桩长关系

Fig. 9 Relation between maximum moment of settlement reducing-pile and length of isolation piles

隔离桩体系不仅能够将隔离桩内外竖向变形隔断,同时也承受堆载引起的水平土压力。因此由于隔离桩的水平压力隔离作用,作用在减沉桩侧的水平土压力有所降低。减沉桩桩身弯矩是由于水平土压力引起的,所以,有隔离桩的情况下减沉桩桩身最大弯矩较无隔离桩时有所降低。隔离桩桩长为 1.2 m 和 1.6 m 时的弯矩隔离效果接近,这是因为边载加载尺寸约为 1 m×1 m,当边载作用时,根据郎肯理论知边载作用产生的水平附加力作用的范围在深度 0~1.54 m 范围内,1.2 m 长的隔离桩完全在水平附加力作用范围内,隔离桩将会出现被水平力推着整体移动的情况<sup>[7]</sup>,1.6 m 长的隔离桩虽然超出了水平附加应力作用范围,但是因嵌固深度不足,因而两种情况下弯矩隔离效果相近。当隔离桩长为 2 m 时,嵌固深度足够,这种情况下弯矩隔离效果显著增加,最大弯矩降低近一半。

2.2 桩径影响分析

为了定量地研究隔离桩桩径对隔离效果的影响,选择桩径分别为 40, 50 和 60 mm 的隔离桩进行试验,试验方案如表 2 所示。

表 2 桩径影响分析试验方案

Table 2 Test programs for influence of diameter of isolation piles				
试验组号	桩长/mm	$D$ /mm	$S_1$ /mm	$S_2$ /mm
第①组	1200	40	240	240
第②组	1200	50	240	240
第③组	1200	60	240	240

(1) 轴力隔离效果分析

图 10 为隔离桩桩径分别为 40, 50, 60 mm 时减沉桩轴力图。3 种情况下减沉桩桩身轴力变化规律与图 4 中变化规律类似,不再进行详细描述。

隔离桩桩径为 40, 50, 60 mm 时减沉桩桩身最大轴力分别为 0.99, 0.91, 0.83 kN。图 11 为第 8 级加载完成后减沉桩最大轴力随隔离桩桩径变化曲线图。由图 11 得:设置桩径为 40 mm 隔离桩时减沉桩最大轴力减小约 9.84%;隔离桩桩径为 50 mm 时减沉桩最大

轴力减小约 17.12%;隔离桩桩径为 60 mm 时减沉桩最大轴力减小约 24.41%。

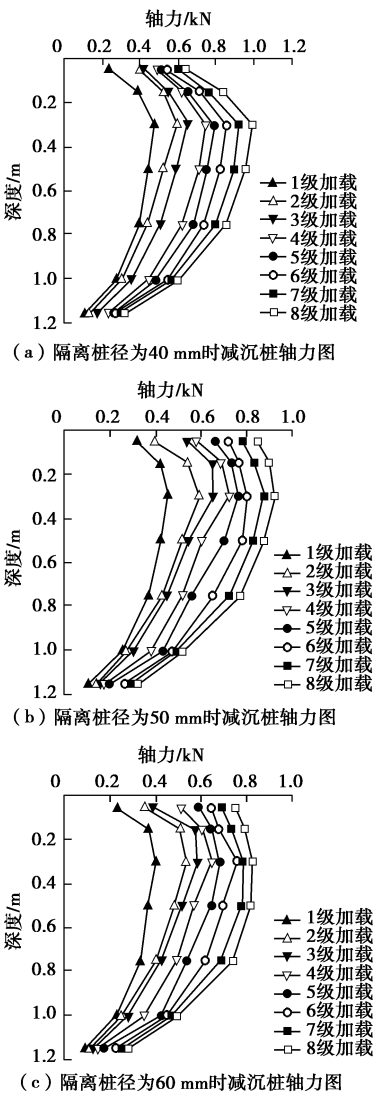


图 10 隔离桩桩径对轴力影响

Fig. 10 Influence of diameter of isolation piles on axial force

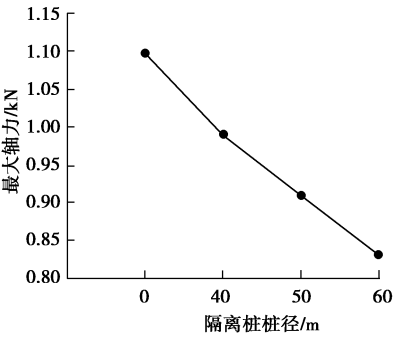


图 11 减沉桩最大轴力与隔离桩桩径关系

Fig. 11 Relation between maximum axial force of settlement-reducing piles and diameter of isolation piles

隔离桩表面积随桩径的增加而增加,相同桩长情况下隔离桩承受的摩阻力随着桩径的增加,因而隔离

桩对竖向变形的隔断作用也随桩径增加而增加。

(2) 弯矩隔离效果分析

图 12 为隔离桩桩径为 40, 50, 60 mm 时减沉桩弯矩图。3 种情况下减沉桩桩身轴力变化规律与图 7 中变化规律类似, 不再进行详细描述。隔离桩, 桩径为 40, 50, 60 mm 时减沉桩桩身最大正弯矩分别为 992.8, 916.0, 837.1 N·m。图 13 为第 8 级荷载加载完成后减沉桩桩身最大弯矩随隔离桩桩径的关系图。由图 13 得: 设置桩径为 40 mm 隔离桩时减沉桩最大弯矩减小约 20.47%; 隔离桩桩径为 50 mm 时减沉桩最大弯矩减小约 26.63%; 隔离桩桩径为 60 mm 时减沉桩最大弯矩减小约 32.95%。隔离桩之所以具有抗水平压力的作用是由于隔离桩之间存在微拱效应, 随着桩径的增加, 桩间距减小, 土拱效应加强, 当桩间距达到临界值时土拱效应达到最大即隔离桩抵抗水平力的

能力得到最大, 这种情况下, 桩径再增加, 隔离桩抵抗水平土压力的能力提高有限<sup>[8]</sup>。从图 13 可得随着桩径增加, 减沉桩最大弯矩逐渐增加, 增加幅度基本稳定在 6.24%。而本文试验模型是根据实际工程设计方案进行等比例放缩而来, 港珠澳实际工程中对隔离桩的桩间距设计并没有按照临界桩间距要求设计, 因而没有出现随着桩径的增加, 减沉桩桩身最大弯矩增加幅度减小的现象。

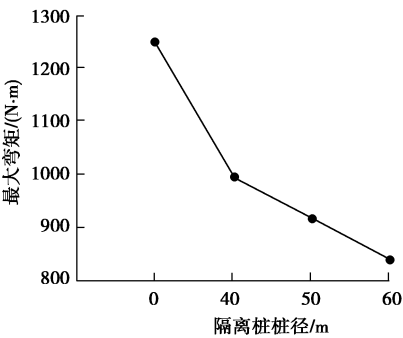


图 13 减沉桩最大弯矩与隔离桩桩径关系

Fig. 13 Relation between maximum moment of settlement-reducing piles and diameter of isolation piles

2.3 桩间距  $S_2$  影响分析

为了定量地研究隔离桩桩间距  $S_2$  对隔离效果的影响, 选择桩间距为分别为 160, 240, 320 mm 的隔离桩进行试验, 试验方案如表 3 所示。

表 3 桩间距  $S_2$  影响分析试验方案

Table 3 Test programs for influence of spacing of isolation piles				
试验组号	桩长/mm	$D$ /mm	$S_1$ /mm	$S_2$ /mm
第①组	1200	40	240	160
第②组	1200	40	240	240
第③组	1200	40	240	320

(1) 轴力隔离效果分析

图 14 为隔离桩间距分别为 160, 240, 320 mm 时减沉桩轴力图。3 种情况下减沉桩桩身轴力变化规律与图 4 中变化规律类似, 不再进行详细描述。隔离桩桩间距  $S_2$  为 160 mm ( $4D$ )、240 mm ( $6D$ ) 和 320 mm ( $8D$ ) 时减沉桩桩身最大轴力分别为 0.91, 0.99, 1.09 kN。图 15 为隔离桩间距分别为 160, 240, 320 mm 时减沉桩弯矩图。图 16 为第 8 级加载完成后减沉桩最大轴力、弯矩随隔离桩桩间距  $S_2$  变化曲线图。由图 16 得: 设置桩间距  $S_2$  为 320 mm 隔离桩时减沉桩最大轴力减小约 0.73%; 隔离桩桩间距  $S_2$  为 240 mm 时减沉桩最大轴力减小约 9.84%; 隔离桩桩间距  $S_2$  为 160 mm 时减沉桩最大轴力减小约 17.12%。

隔离桩桩间距  $S_2$  减小与隔离桩桩径  $D$  的增加的原理是一样的: 通过减小桩间距来增强隔离桩之间的土拱效应以达到降低减沉桩桩身轴力的目的。同时可

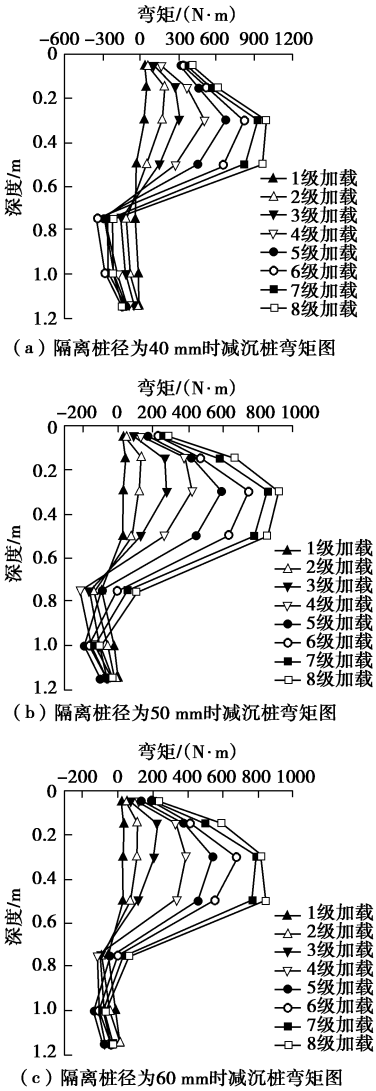


图 12 隔离桩桩径对弯矩影响

Fig. 12 Influence of diameter of isolation piles on bending moment

以发现, 当隔离桩桩间距  $S_2$  达到  $8D$  时, 对减沉桩轴力的影响几乎可以忽略不计。

作用<sup>[9]</sup>, 这种绕流阻力相比土拱效应产生的阻力要小很多。由图 16 可得当隔离桩桩间距  $S_2$  达到  $8D$  时, 轴力、弯矩隔离效果都非常很弱。

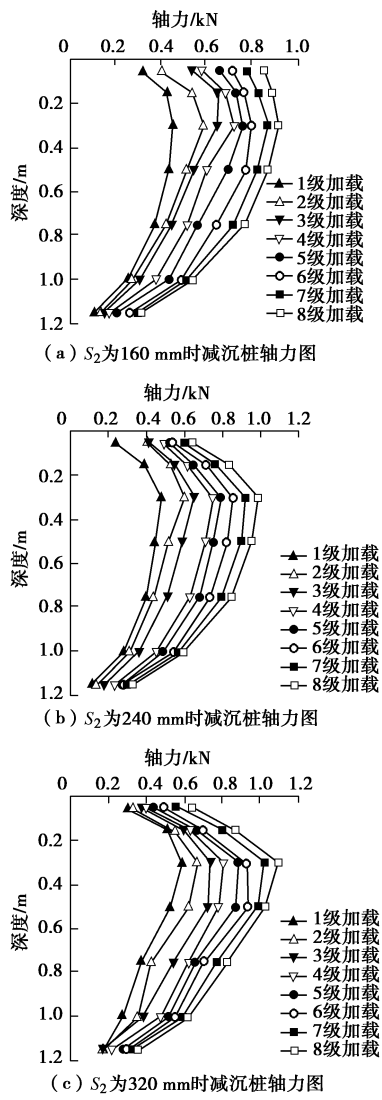


图 14 隔离桩桩间距  $S_2$  对轴力影响

Fig. 14 Influence of pile spacing  $S_2$  of isolation piles on axial force

(2) 弯矩隔离效果分析

图 15 为隔离桩桩间距  $S_2$  为 160, 240, 320 mm 时减沉桩桩身轴力变化规律与图 7 中变化规律类似, 不再进行详细描述。隔离桩桩间距为 160, 240, 320 mm 时减沉桩桩身最大正弯矩分别为 834.4, 992.8, 1144.5 N·m。由图 16 得: 设置  $S_2$  为 320 mm 隔离桩时减沉桩最大弯矩减小约 8.32%;  $S_2$  为 240 mm 时减沉桩最大轴力减小约 20.47%;  $S_2$  为 160 mm 时减沉桩最大轴力减小约 33.16%。当  $S_2$  达到  $8D$  时, 对减沉桩弯矩的减小只有 8%左右, 与其它试验方案所产生的弯矩隔离效果相比要小的多。这是由于随着  $S_2$  的增加, 隔离桩之间的土拱效应逐渐减弱, 当  $S_2$  达到一定上限值后, 隔离桩之间不再形成土拱, 这时隔离桩对土体只有绕流阻力的

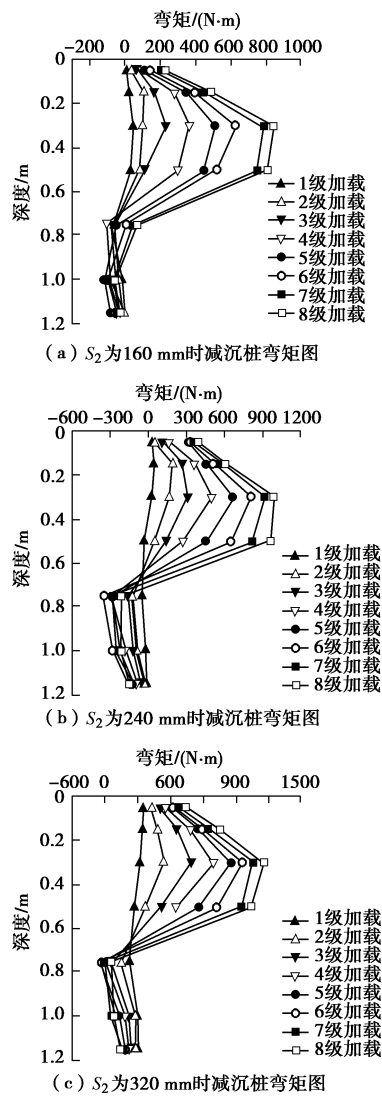


图 15 隔离桩桩间距  $S_2$  对弯矩影响

Fig. 15 Influence of pile spacing  $S_2$  of isolation piles on bending moment

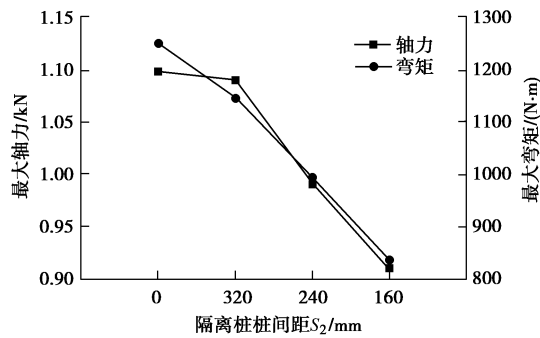


图 16 减沉桩最大轴力、弯矩与隔离桩桩间距  $S_2$  关系  
Fig. 16 Relation between maximum axial force and moment of settlement-reducing piles and  $S_2$  of isolation piles

2.4 距减沉桩距离  $S_1$  影响分析

为了定量地研究隔离桩与减沉桩之间距离  $S_1$  对隔离效果的影响, 选择  $S_1$  分别为 240 mm 和 320 mm 的隔离桩进行试验, 试验方案如表 4 所示。

表 4 距减沉桩距离  $S_1$  影响分析试验方案

Table 4 Test programs for influence of distance of $S_1$				
试验组号	桩长/mm	$D$ /mm	$S_1$ /mm	$S_2$ /mm
第①组	1200	40	240	240
第②组	1200	40	320	240

(1) 轴力隔离效果分析

图 17 为  $S_1$  分别为 240 mm 和 320 mm 时减沉桩轴力图, 其变化规律与图 4 中变化规律类似。

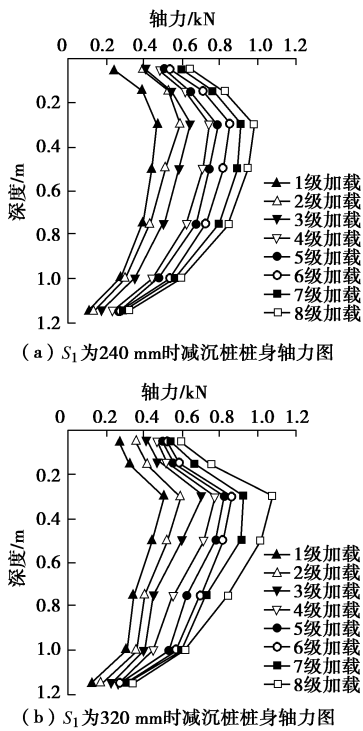


图 17  $S_1$  对轴力的影响

Fig. 17 Influence of  $S_1$  on axial force

当距离  $S_1$  为 240 mm 和 320 mm 时减沉桩桩身最大轴力分别为 0.99, 1.09 kN。 $S_1$  从 240 mm 增加到 320 mm 时减沉桩最大轴力增加 10.10%, 可见减沉桩桩身最大轴力随着  $S_1$  的增加而增加。同时可得, 当  $S_1$  达到 320 mm 时的减沉桩轴力图与不考虑隔离桩时的减沉桩轴力图 (图 5) 很类似, 在 0~0.3 m 范围内的负摩阻力很接近, 这说明当  $S_1$  达到 320 mm 时, 隔离桩对降低减沉桩顶部垫层及其土体的沉降效果很微弱。

(2) 弯矩隔离效果分析

图 18 为距离  $S_1$  为 240 mm 和 320 mm 时减沉桩弯矩图。其变化规律与图 7 中变化规律类似。 $S_1$  为 240 mm 和 320 mm 时减沉桩桩身最大正弯矩分别为 992.8 N·m 和 1015.7 N·m,  $S_1$  从 240 mm 增加到 320 mm 时

减沉桩最大弯矩增加 2.25%, 可知, 距减沉桩距离  $S_1$  的变化对弯矩的隔离效果影响不显著。出现上述现象的原因是由于在同样桩间距  $S_2$  和桩径  $D$  情况下, 距减沉桩距离  $S_1$  的减小使得减沉桩上部垫层及其地基土体沉降减小, 但是正是因为这种机理, 使得减沉桩与隔离桩之间土体存在水平土压力, 这种水平土压力随着距减沉桩距离  $S_1$  的减小而增加; 同时边载作用所产生的水平土压力在经过隔离桩后剩余的水平土压力, 当  $S_1$  距离小的时候, 理论上, 剩余土压力传递到减沉桩桩身过程中损失较少, 作用在减沉桩桩身所产生的弯矩应该稍微大, 但是由于预先存在的土压力与剩余土压力方向相反, 在这样两种水平土压力作用下, 最终剩余的水平土压力反而降低, 这也是距减沉桩距离  $S_1$  的减小而减沉桩桩身最大弯矩略有减小的原因。

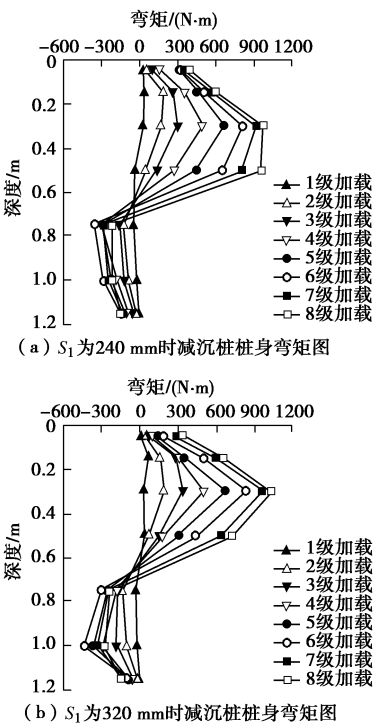


图 18  $S_1$  对弯矩的影响

Fig. 18 Influence of  $S_1$  on bending moment

3 结 论

以港珠澳沉管隧道为工程背景, 采用室内模型试验对岛头高边载作用下隔离桩隔离效果的影响因素与影响效果进行了定量的分析得出如下结论:

(1) 相比无隔离桩时, 隔离桩的存在能够明显降低减沉桩桩身负摩阻力的影响, 减小减沉桩桩身最大轴力和弯矩。

(2) 减沉桩桩身最大轴力、弯矩随隔离桩桩长的增加而减小; 同时, 当隔离桩桩长达到所需的嵌固深度时, 对弯矩的隔离效果极其显著, 最大弯矩降低 45%



之多, 因此, 设计隔离桩长时, 不仅需要确保隔离桩长度大于堆载作用的影响深度, 而且最好桩端位于性状较好的土层中。

(3) 隔离桩桩径的增加不仅提高隔离桩对竖向变形的隔断作用能力, 同时也使得隔离桩之间土拱效应增强, 因此, 减沉桩桩身最大轴力、弯矩随着隔离桩桩径的增加而减小, 特别是弯矩的隔离效果随隔离桩桩径的增加而愈加显著。

(4) 隔离桩桩间距  $S_2$  的减小与隔离桩桩径的增加所产生的效果类似, 减沉桩桩身最大轴力、弯矩均随隔离桩桩间距  $S_2$  的减小而减小; 同时, 当隔离桩桩间距  $S_2$  达到  $8D$  时, 对轴力与弯矩的隔离效果可以忽略不计, 本文认为  $8D$  是隔离桩桩间距的上限值。

(5) 减沉桩桩身最大轴力随距减沉桩距离  $S_1$  的减小而减小, 而距减沉桩距离  $S_1$  的变化对弯矩的隔离效果影响不显著; 同时, 当  $S_1$  达到  $8D$  时, 轴力隔离效果很微弱。

隔离桩不但对轴力、弯矩有隔离效果, 同时也对沉降有一定的减小作用, 这具体体现在减沉桩桩身轴力上。有隔离桩的情况下减沉桩桩身负摩阻力明显降低, 同时减沉桩桩身轴力也降低, 这是由于隔离桩的存在降低了减沉桩顶部垫层及其地基土体沉降, 相应地, 不但负摩阻力降低, 而且地基土体分担的荷载也增加, 这就导致减沉桩桩顶分担的荷载有所减小。

隔离桩的设计是一个综合性的问题, 不仅要考虑桩径、桩长,  $S_1$  和  $S_2$  等因素的影响, 还需要考虑经济性问题。因此, 将桩间距按照临界最小桩间距设计不一定就是最合适的方案, 需要综合上述多种因素进行考虑。

## 参考文献:

- [1] 刘芳, 谭忠盛, 董志明. 北京地铁渡线暗挖隧道施工力学分析[J]. 铁道建筑, 2006(3): 15. (LIU Fang, TAN Zhong-sheng, DONG Zhi-ming. Mechanical analysis of construction process of NATM (New Austria Tunnelling Method) tunnel in crossover section of Beijing metro project[J]. Railway Engineering, 2006(3): 15. (in Chinese))
- [2] 张冬梅, 黄宏伟, 王箭明. 复杂环境条件下浅埋近间距大直径盾构隧道施工的相互影响及控制[J]. 现代隧道技术, 2008(增刊 1): 203 - 206. (ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei, WANG Jian-ming. Interrelationship and control on construction of shallow-buried large diameter shield tunnel with small interval under complex conditions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008(S1): 203 - 206. (in Chinese))
- [3] 闫静雅. 桩基础全寿命期对邻近已有隧道的的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (YAN Jing-ya. The influence of pile foundation in life-cycle on adjacent existing tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [4] 纪新博, 赵文, 李慎刚, 等. 隔离桩在隧道侧穿邻近浅基建筑中的应用[J]. 东北大学学报: (自然科学版), 2013, 34(1): 135 - 139. (JI Xin-bo, ZHAO Wen, LI Shen-gang, et al. Application of isolation piles on metro tunnel for side-crossing the buildings with shallow foundation[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(1): 135 - 139. (in Chinese))
- [5] 刘毓毓, 陈福全, 左广洲. 大面积堆载下软土地基的应力隔离与加固实例分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 846 - 849. (LIU Yu-chuan, CHEN Fu-quan, ZUO Guang-zhou. Case study of synthetic method of stress isolation and ground reinforcement to handle soft ground problem induced by adjacent surcharge load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 846 - 849. (in Chinese))
- [6] 姚海波, 王梦恕, 张顶立, 等. 导洞 - 隔离桩体系工作机理研究与侧向变形分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 105 - 109. (YAO Hai-bo, WANG Meng-shu, ZHANG Ding-li, et al. Mechanism of a drift-pile system and analysis of its horizontal displacement[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 105 - 109. (in Chinese))
- [7] 于汝康. 边载作用下隔离桩的隔离效果研究[D]. 南京: 东南大学, 2012. (YU Ru-kang. Study on isolation effects of isolation piles under side loading[D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese))
- [8] 竺明星, 龚维明, 何小元, 等. 堆载作用下考虑土拱效应的被动桩变形内力半解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 10 - 21. (ZHU Ming-xing, GONG Wei-ming, HE Xiao-yuan, et al. Semi-analytical solution to deformation and internal force of passive piles under surcharge loads considering soil arching effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 10 - 21. (in Chinese))
- [9] 沈珠江. 桩的抗滑阻力和抗滑桩的极限设计[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 51 - 56. (SHEN Zhu-jiang. Stabilizing force and design method for anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 51 - 56. (in Chinese))