

水泥土强度对型钢水泥土组合梁的影响研究*

丁勇¹, 俞设¹, 王平², 何宁³

(1. 南京理工大学 理学院, 南京 210094; 2. 中国第一冶金建设公司, 武汉 430081;
3. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘要:型钢水泥土搅拌墙在基坑工程中有着广泛的应用, 因为没有充分了解水泥土在搅拌墙中起到的作用, 水泥土的刚度仅被作为安全储备, 这无疑造成一定的浪费。为了研究水泥土强度对搅拌墙的影响, 本文以水泥土强度为变量设计了系列双型钢水泥土组合梁试验, 采用分布式光纤采集试验梁加载过程的应变数据, 提出了针对 H 型钢的分布式光纤应变数据的处理方法。通过对实验数据的处理和分析, 得到了水泥土强度对组合梁挠度、刚度的影响规律, 以及型钢与水泥土对组合梁外部荷载的分担情况。本文对型钢水泥土搅拌墙的理论研究与实际应用有一定的参考价值。

关键词:水泥土强度; 组合梁; 挠度; 刚度

中图分类号: O319.56 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)03-0698-05

Effect Study of Cement-soil Strength on Steel Cement-soil Composite Beam

Ding Yong¹, Yu She¹, Wang Ping², He Ning³

(1. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P.R. China; 2. China First Metallurgical Construction Co. Ltd., Wuhan 430081, P.R. China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R. China)

Abstract: Soil mixing wall has been widely used in foundation pit engineering. There is no full understanding of soil cement in the role of soil mixing wall and the stiffness of soil cement is only taken as a safety reserve, which will undoubtedly cause some waste. To study the effects of soil cement strength on the soil mixing wall, this paper designs a series of double-steel cement soil composite beam tests taking cement soil strength as a variable. It used the strain data of distributed fiber optic acquisition test beams loading process and put forward treatment method for H-beam distributed fiber optic strain data. Through processing and analysis of the experimental data, it got the law on effect of cement soil strength to the composite beam deflection and stiffness as well as the sharing conditions of steel and cement soil of the composite beams external load. This paper has a certain reference value to soil mixing wall theory and practical application.

Keywords: cement soil strength; composite beam; deflection; stiffness

0 引言

型钢水泥土搅拌墙, 通常称为 SMW 工法, 是一种由水泥土搅拌桩柱列式挡墙和型钢(一般采用 H 型钢)组成的复合围护结构, 芯桩与水泥土共

同工作承受外部荷载^[1]。这种结构充分发挥了水泥土混合体和型钢的力学特性。目前, 型钢水泥土搅拌墙在我国上海、江苏、浙江、天津等沿海软土地区应用已经比较普遍^[2-7]。但由于没有充分了解水泥土在搅拌墙中起到的作用, 这部分刚度仅被作

* 收稿日期: 2016-09-27(修改稿)
作者简介: 丁勇(1977-), 男, 江苏海安人, 副教授, 主要从事岩土工程安全监测研究。E-mail: danpub1977@gmail.com
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30920130112008); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201005006)

为安全储备,这无疑造成一定的浪费^[8]。工程实际中,水泥土的强度范围为0.3~4 MPa^[9],这一范围内水泥土强度对型钢水泥土组合梁的影响值得深入研究。

本研究对不同水泥土强度型钢水泥土组合梁施加均布面荷载进行了抗弯试验,目的是研究不同水泥土强度条件下,型钢水泥用组合梁的挠度、荷载分配,以及刚度的变化情况与水泥土强度之间的关系,以期了解不同水泥土强度对组合梁的贡献与影响,为型钢水泥土构件的合理设计提供依据。

1 试验材料与设计

1.1 试验材料

本试验的土体来自南京长江沿岸冲击形成的粉质粘土,土样的基本物理力学指标如表1所示。

表1 土样基本参数

Table 1 Basic parameters of soil samples					
含水率/ %	比重/ (g·cm ⁻³)	空隙比	塑限/%	液限/ %	土的类型
26.2	2.7	1.13	18.2	32.5	粉质粘土

试验计划进行0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5 MPa这7个强度水泥土的型钢水泥土组合梁试验,试验所用水泥为325#普通硅酸盐水泥,各强度对应的水泥掺入比分别为:8.5%、13.3%、16.3%、23.2%、26.3%、28.2%、32.1%,水泥土根据相关规范进行制备。

1.2 试验设计

试验中,型钢水泥土组合梁模型截面尺寸为600 mm×300 mm,长度为2 000 mm,组合梁芯材采用两根截面尺寸为200 mm×200 mm的H型钢,以密插形式与水泥土在模板中浇筑成型。为减少实验误差,每种水泥土强度同批制作3根组合梁,在室内养护28 d,每24 h浇水一次,浇筑第7 d脱模。

为更好地模拟现场情况,本试验采用均布的面荷载对型钢水泥土组合梁进行加载。同时,为避免在支座附近会出现应力集中,造成试验梁的不正常破坏,面荷载施加在组合梁跨中1.2 m区域内。区别与传统的变形测量采用应变片的点式测量方法,本试验采用分布式光纤应变测量技术(BOTDA),在两根型钢翼缘与腹板交界处布设分布式传感光

纤,自动测量加载过程中型钢的变形数据,可获取更加准确与充分的数据。光纤布置图如图1所示。

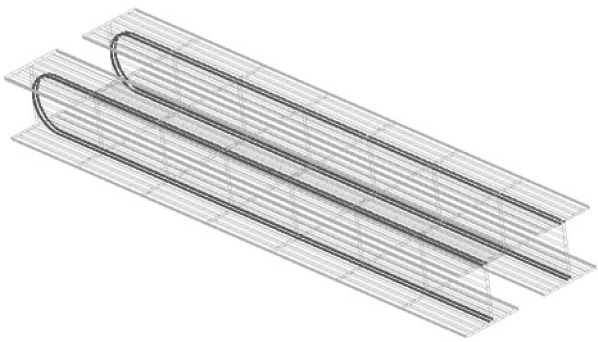


图1 型钢中光纤布置图
Fig. 1 Fiber arrangement in steel

2 试验数据处理与分析

2.1 数据处理

根据BOTDA所测量到的应变数据,经过换算可以得到桩身的弯矩、挠度等,但是在计算前需要先消除中和轴位置不确定的影响。

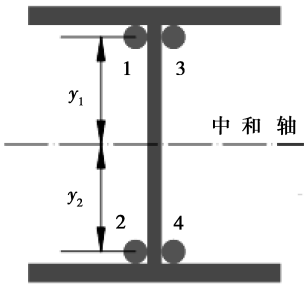


图2 型钢截面图
Fig. 2 Cross section of optical fiber

图2为型钢截面图, y_1 、 y_2 为光纤1、2到中和轴的距离,中和轴位置在桩身某截面处。光纤1、2的应变满足式(1)、式(2),由式(1)、式(2)可推出式(3):

$$\varepsilon_1(x) = \frac{M(x)}{EI}y_1(x) \tag{1}$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{M(x)}{EI}y_2(x) \tag{2}$$

$$M(x) = \frac{EI[\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x)]}{Y(x)} \tag{3}$$

$$Y(x) = y_1(x) - y_2(x) \tag{4}$$

式中: $M(x)$ 为某截面处弯矩; I 为截面惯性矩; E 为材料弹性模量; $\varepsilon_1(x)$ 为该截面处光纤1受荷载作用而产生的真实应变; $\varepsilon_2(x)$ 为该截面处光纤2受荷载作用而产生的真实应变; $Y(x)$ 为该截面处光

纤 1 与光纤 2 之间的距离。由于光纤 1 与光纤 2 之间的距离可以通过精确测量得到的,从而可以计算出梁各截面所受的弯矩。

通过对弯矩的积分可以得到挠度公式:

$$\omega(x) = - \int \left[\int \frac{M(x)}{EI} dx \right] dx + Cx + D \quad (5)$$

式中: $\omega(x)$ 为某截面处的挠度; C 和 D 为根据边界条件所确定的参数。因为试验梁为简支梁,所以参数 C 和 D 均为 0,结合式(3)可推出试验梁的挠度分布公式:

$$\omega(x) = - \int \left[\int \frac{\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x)}{Y(x)} dx \right] dx \quad (6)$$

2.2 组合梁共同工作阶段分析

型钢水泥土的共同作用一直是国内相关研究的焦点^[10-11]。本文根据水泥土在组合梁中发挥的作用,在型钢屈服之前,将型钢水泥土之间的共同作用划分为 2 个阶段:

(1)弹性工作阶段:在水泥土开裂之前,型钢水泥土组合梁处于弹性工作状态。从本试验的试验数据来看,该阶段挠度很小且发展缓慢,应力应变曲线近似直线,承受的外部荷载约为屈服荷载的 20%~30% 以内。

(2)带裂缝工作阶段:水泥土出现裂缝,受拉区水泥土应力达到抗拉强度,中性轴上移,受压区水泥土继续工作。从本试验的试验结果来看,裂缝不仅在组合梁跨中出现,在梁的弯剪区也出现了弯剪斜裂缝,组合梁跨中挠度增加速率比弹性工作阶段加快,应力应变曲线出现拐点后斜率减小并出现波动。

2.3 组合梁的挠度分析

为研究 0.5~3.5 MPa 间 7 种不同强度水泥土对组合梁挠度的影响,分别取弹性工作阶段和带裂缝工作阶段的挠度曲线进行分析,挠度曲线通过式(6)计算得到,如图 3、图 4 所示。其中图 3 是在 150 kN 作用下的挠度曲线图,H-pile 曲线表示该荷载作用下纯型钢的挠度。从图中可以看出,在该荷载下随着水泥土强度的提高,组合梁挠度减少。当水泥土强度为 0.5 MPa 时,组合梁的挠度和纯型钢的挠度几乎相同,可见当水泥土强度较低时,水泥土对减少组合梁的变形没有太大作用。图 4 是 400 kN 作用下的组合梁挠度曲线图。与图 3 相

比,该荷载下不同强度组合梁的挠度差异减小,此时组合梁处于带裂缝工作阶段,受拉区水泥土已退出工作,由于受压区水泥土的存在,水泥土分担了部分外部荷载,并且水泥土强度越高,这一作用越明显。

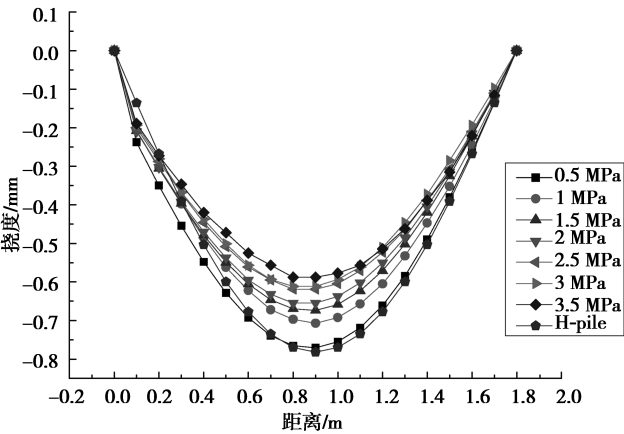


图 3 150 kN 作用下不同水泥土强度的型钢水泥土组合梁的挠度曲线图

Fig. 3 Deflection curves of steel beams with different cement-soil strength under 150 kN

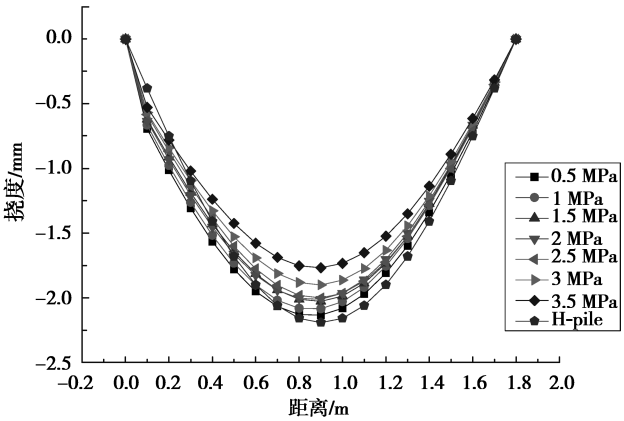


图 4 400 kN 作用下不同水泥土强度的型钢水泥土组合梁的挠度曲线图

Fig. 4 Deflection curves of steel beams with different cement-soil strength under 400 kN

2.4 组合梁的荷载分担情况分析

在本实验模型中,由于分布式光纤直接贴在型钢表面,光纤测量的应变数据反映了荷载作用下型钢的应变特征,根据式(3)代入型钢的截面惯性矩 I 和弹性模量 E (各截面基本一致)可以求出型钢各截面的弯矩值。将型钢承担的总弯矩与该荷载下的外部施加的总弯矩进行比较,就可以得到同一荷载下水泥土与型钢对弯矩的分担情况,如图 5

所示。

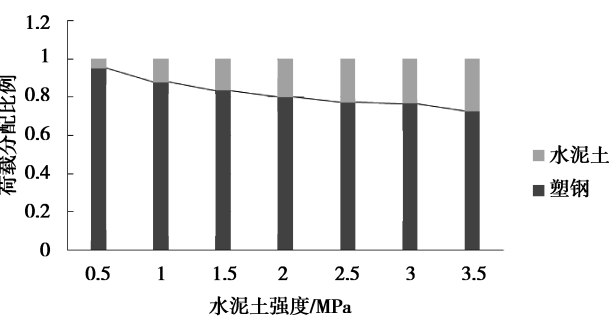


图 5 不同强度水泥土在 150 kN 作用下荷载分担图
Fig. 5 Load balancing figure with different cement-soil strength under 150 kN

图 5 中曲线表明在弹性工作阶段,150 kN 荷载作用下,随着水泥土强度的增强,水泥土在组合梁中发挥的作用也逐渐增大,0.5 MPa 水泥土对弯矩分担作用不大,水泥土强度在 2 MPa 左右时可以承担约 20%的弯矩,当水泥土强度达到 3.5 MPa 时其承担的弯矩为 26.2%,相对于 2 MPa 强度的水泥土,水泥土强度增加了 75%但起到的分担作用只增加了 31%。

2.5 不同水泥土强度对组合梁刚度的影响

国内一些学者^[12]研究证实,在弹性阶段型钢水泥土组合梁的刚度保持不变,随着荷载的提高组合梁的刚度会逐渐减少,为了充分比较水泥土强度对组合梁刚度的影响,本文主要研究弹性阶段型钢水泥土组合梁的刚度随水泥土强度的变化情况。

在弹性工作阶段,根据材料力学的理论,组合梁所受弯矩与外界荷载以及所测应变数据符合下列方程式:

$$M = Fl \tag{7}$$

$$\frac{M}{EI} \times h = \varepsilon \tag{8}$$

由此可以推出,型钢水泥土组合梁的弯矩反比于荷载-应变斜率,如式(9)所示:

$$k = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta F} = \frac{lh}{EI} \tag{9}$$

由此可以计算出不同强度的型钢水泥土组合梁在荷载作用下的刚度大小,图 6 即是在 150 kN 荷载作用下的型钢水泥土组合梁的刚度随水泥土强度的变化关系图。从图中可以看出,随着水泥土强度的提高,型钢水泥土组合梁的刚度也随之增

大,当水泥土强度达到 2 MPa 时,水泥土对组合梁的刚度贡献就超过 20%。根据曲线的斜率可以看出,当水泥土强度低于 0.5 MPa 时,水泥土对组合梁的刚度贡献不明显;而在 0.5~2 MPa 之间时,水泥土强度的提高对组合梁的刚度增长贡献最大;当水泥土强度高于 2 MPa 时,虽然水泥土对组合梁的刚度贡献很大,但是水泥土每提高 1 MPa 强度对组合梁的刚度的提高贡献降低。

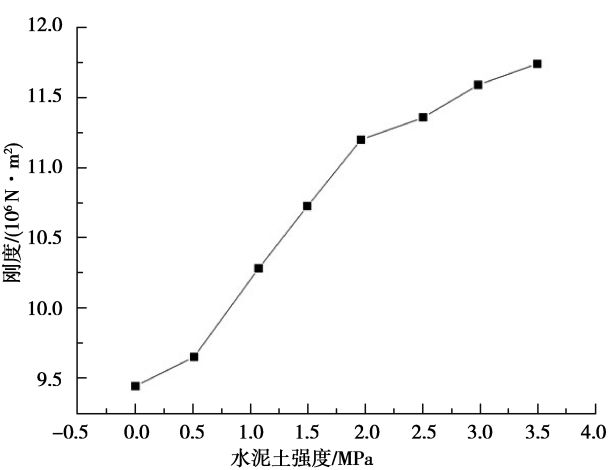


图 6 150 kN 作用下型钢水泥土组合梁的刚度随水泥土强度的变化关系图
Fig. 6 Stiffness of steel cement-soil beams changes with cement soil strength under 150 kN

3 结论

通过对型钢水泥土组合梁试验数据的分析,可得到如下结论:

(1)从水泥土的角度,可将型钢与水泥土的共同作用划分为弹性工作阶段和带裂缝工作阶段。弹性工作阶段处于外部荷载约为屈服荷载的 20%~30% 范围以内;带裂缝工作阶段中受拉区水泥土破坏,受压区水泥土仍发挥工作,跨中挠度增加速率比弹性工作阶段加快。

(2)相同荷载作用下,型钢水泥土组合梁的挠度随水泥土强度的增大而减小,弹性工作阶段组合梁挠度随水泥土强度的变化差异明显,水泥土开裂后,不同强度组合梁的挠度差异减小。同时,水泥土承担的弯曲荷载随着强度的增大而增大。

(3)水泥土强度对组合梁刚度的提高也起到了作用。当水泥土强度较低时,其对组合梁刚度影响不大,在 0.5~2 MPa 之间时水泥土强度对组合

梁的刚度提升较大,当强度过高时,水泥土强度的提升对组合梁刚度贡献的增加反而会下降。

参考文献(References)

- [1] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997. (Liu Hang, Hou Xueyuan. Foundation engineering handbook [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 孔德志,张慧.型钢水泥土抗弯工作性能[J].河南大学学报(自然科学版),2005,35(1):92-96. (Kong Zhide, Hui Zhang. Bending performance steel cement soil [J]. Henan University (Natural Science Edition), 2005,35(1):92-96. (in Chinese))
- [3] 马郢,徐光黎. SMW+水泥土桩锚结构在基坑工程中的应用——以武汉长江 I 级阶地基坑工程为例[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(4):934-938,964. (Ma Xun, Xu Guangli. Application of SMW and pile anchor retaining structure in a soft soil excavation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(4):934-938,964. (in Chinese))
- [4] 曾智,沈水龙,王志丰,等. 上海水泥固化黏土的强度与硬度相关性研究[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(2):311-314. (Zeng Zhi, Shen Shuilong, Wang Zhifeng, et al. Relationship between Strength and Hardness of the Cement Treated Shanghai Clayey Soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014,10(2):311-314. (in Chinese))
- [5] 丁勇,王平,何宁,等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(5):719-724. (Ding Yong, Wang Ping, He Ning, et al. New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(5):719-724. (in Chinese))
- [6] 张璞,柳荣华. SMW 工法在深基坑工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(增1):1104-1107. (Zhang Pu, Liu Ronghua. The application of SMW method in foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(Sup.1):1104-1107. (in Chinese))
- [7] 朱廷忠,郑刚,李志国,等. 天津市浅部典型土层水泥土力学性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(5):728-732. (Zhu Tingzhong, Zheng Gang, Li Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical behavior of cemented soil of shallow soil strata in Tianjin [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005,1(5):728-732. (in Chinese))
- [8] 俞设,王平,丁勇,等. 型钢水泥土梁实验方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(S2):1845-1847. (Yu She, Wang Ping, Ding Yong, et al. Experiment Research of the Steel Cement-soil Beams [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(S2):1845-1847. (in Chinese))
- [9] 地基处理手册(第二版)编写委员会. 地基处理手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000. (Foundation Treatment Handbook (Second Edition) Writing Committee. Foundation treatment handbook (second edition) [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2000. (in Chinese))
- [10] 王健. H 型钢—水泥土组合结构试验研究及 SMW 工法的设计理论与计算方法[D]. 上海:同济大学,1998. (Wang Jian. H-beam-cement soil composite structure study and design of SMW theory and calculation method [D]. Shanghai: Tongji University, 1998. (in Chinese))
- [11] 郑刚,张华. 型钢水泥土复合梁中型钢-水泥土相互作用试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(5):943-950. (Zheng Gang, Zhang Hua. Experimental study of interaction between cemented soil and shape steel of shaped steel reinforced cemented soil composite beam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(5):943-950. (in Chinese))
- [12] 孔德志,张庆贺,宋杰. 劲性水泥土连续墙的抗弯刚度研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(11):1935-1938. (Kong Dezhi, Zhang Qinghe, Song Jie. Strength of cement-soil continuous wall bending stiffness study [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(11):1935-1935. (in Chinese))