

型钢混凝土组合结构承台受力机理分析

赵晨¹, 陈长盛², 刘玉擎²

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 同济大学, 上海市 200092]

摘要: 为实现承台轻量化和提升承载能力, 提出了一种新型型钢混凝土组合二桩承台。为研究其受力机理, 建立了传统钢筋混凝土承台与新型承台的三维非线性有限元模型, 比较了两种承台的破坏过程, 揭示了新型承台中型钢下弦杆、斜撑杆截面积、承台高度、混凝土强度等对承台初始刚度、极限承载力的影响, 并基于拉压杆模型提出了新型承台极限承载力计算方法。结果表明: 新型承台破坏模态为剪切破坏; 相比于传统承台, 相同尺寸的新型承台承载力可提高2.7倍; 增加下弦杆截面积与承台高度可显著提升承台的极限承载力, 而对刚度影响较小; 提出的计算方法与数值模拟结果具有较高的吻合度。

关键词: 承台设计; 组合结构; 拉压杆模型; 有限元计算

中图分类号: U443.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0240-07

Analysis on Stress Mechanism of Steel Reinforced Concrete Composite Structure Base Slab

ZHAO Chen¹, CHEN Changsheng², LIU Yuqing²

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: To achieve the lightweight of base slab and enhance its load-bearing capacity, a new type of steel reinforced concrete composite two-pile base slab is proposed. To study its stress mechanism, a three-dimensional nonlinear finite element models are established for both the traditional reinforced concrete base slab and the new base slab to compare the failure process of the two base slabs, and reveal the effects of lower steel chord of new base slab, diagonal member sectional area, base slab height and concrete strength on initial stiffness and ultimate bearing capacity of the base slab. Based on the strut-and-tie model, a new calculation method for the ultimate bearing capacity of base slab is proposed. Results show that the failure mode of the new base slab is shear failure. Compared with the traditional base slab, the bearing capacity of the new base slab with the same size can be increased by 2.7 times. Increasing the lower chord section and base slab height can significantly improve the ultimate bearing capacity of base slab with minor impact on stiffness. The proposed calculation method has a high degree of agreement with the numerical simulation results.

Keywords: design of base slab; composite structure; strut-and-tie model; finite element analysis

0 引言

承台起到将上部结构荷载传递至基础的作用, 是桥梁下部结构的重要组成部分, 多采用钢筋混凝土结构。而随着承载能力需求的不断提升, 承台高度不断增加, 既导致基坑深度加大, 大体积混凝土浇筑等施工困难, 同时降低了材料利用率, 经济性较差。而型钢混凝土组合承台利用型钢结构的高承载能力, 在满足承载能力的要求的同时, 能够减少承台高度, 实现承台的轻量化设计。

承台承受弯剪荷载, 既有研究多采用拉压杆模

型分析钢筋混凝土承台的承载性能。Adebar等^[1]对6个厚承台模型开展了试验, 结果表明拉压杆模型能更准确地描述承台的传力模式。Boulifa等^[2]分析了四桩承台的试验数据, 提出了四桩承台的承载力计算公式。Guo^[3]、陈愿刚^[4]分别提出了一种基于空间拉压杆模型优化的双桩、多桩钢筋混凝土承台的抗冲切承载力计算公式。童敏^[5]通过四桩、五桩承台的对比试验, 提出了等边厚承台“穹顶拉压杆模型”的传力模式。季静等^[6]对75个厚桩承台试件开展模型试验, 提出了二、三、四及六桩厚承台的受冲切承载力计算公式。蒋大骅等^[7]对不同桩数承台的抗弯强度进行理论研究, 推导出一般矩形承台的抗弯承载力计算公式。黄明海^[8]对5组双柱墩式桩基承台

收稿日期: 2025-11-19

作者简介: 赵晨(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

进行分析,提出了抗弯承载力计算模型。为提升承台承载力,部分学者将钢纤维混凝土应用于承台。雷杰^[9]、王武刚等^[10]将钢纤维混凝土用于二桩承台使极限承载力提高了67%。邱宏禧等^[11]通过模型试验分析了钢纤维混凝土二桩承台传力机理。孙成访等^[12-13]对30个模型开展了静载试验,提出了钢纤维混凝土承台抗冲切及抗剪承载力的计算公式。谢海兵^[14]基于高轴压力作用,提出了两桩承台拉压杆计算模型。孙延辉^[15]对空间拉压杆模型进行简化,提出了群桩基础厚承台拉压杆计算模型。李强等^[16]对双薄壁墩承台进行理论研究,提出了双薄壁墩承台拉压杆模型强度计算公式。王雨权等^[17]对比了8个承台的梁式受弯理论和拉压杆模型计算结果,提出了三维拉压杆简化模型。型钢构件应用于承台的相关研究尚未开展,埋置型钢构件对承台承载力的影响亟需阐明。

为此,提出了一种预埋K形桁架的型钢混凝土组合二桩承台构造。为研究该类型承台的受力机理,建立了非线性有限元模型,研究了该类承台的破坏模态,同时分析下弦杆截面面积、斜撑杆截面面积、承台高度对承载性能的影响,基于拉压杆模型提出了该类型型钢组合承台的承载力计算方法。

1 新型组合结构承台构造

如图1所示,提出的新型型钢混凝土组合结构承台由型钢立柱、K形型钢桁架、普通钢筋与现浇混凝土组成。H型钢立柱布置于两根桩基正上方,通过两组由上、下弦杆及斜撑构成的K形型钢桁架相连。型钢桁架各杆件由两个尺寸相同的等边角钢以单边对接的方式构成,上弦杆中部设有节点板,与斜撑相连。各杆件设有圆孔,以便于穿入普通钢筋。

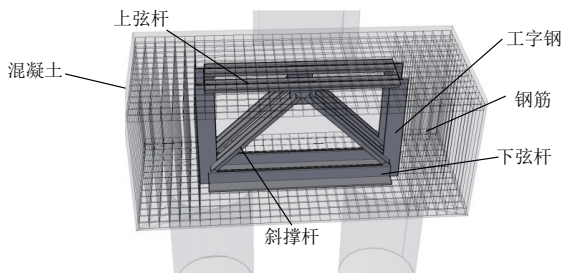


图1 新型承台构造

型钢采用Q355级高强钢,H型钢为600 mm×300 mm×10 mm规格工字钢,下弦杆采用250 mm×250 mm×35 mm的L形等边角钢,上弦杆及斜撑杆采用下弦杆采用150 mm×150 mm×14 mm的L形等边角钢。

传统钢筋混凝土承台通过钢筋抵抗弯剪作用,

该新型承台增加了型钢构件。新型承台施工及安装过程包括:对型钢构件开孔以便穿入钢筋;型钢构件之间采用焊接或螺栓连接;将型钢运输至施工现场,定位放入模板内并固定;施工承台普通钢筋;浇筑混凝土并养护。

2 数值分析

2.1 有限元模型

如图2所示,在通用有限元软件ABAQUS中建立非线性有限元模型,采用准静力加载,通过显式过程求解。设承台计算基本模型长6.7 m,宽2.9 m,高2.8 m,下部桩径1.8 m。承台内部普通钢筋纵筋直径12 mm,间距150 mm。横向及竖向钢筋直径16 mm,间距200 mm。

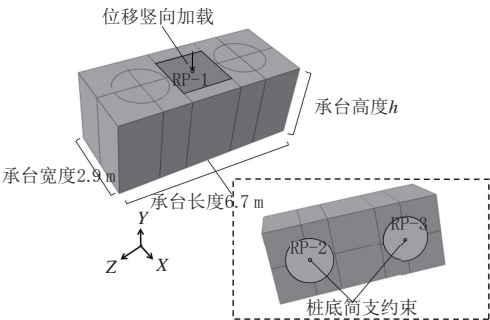


图2 承台几何模型

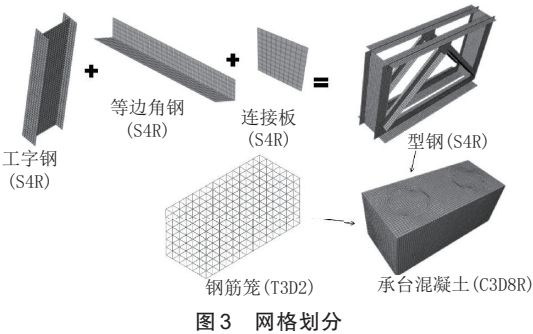
有限元模型分组见表1,主要变参为承台构造类型、高度、下弦杆与斜撑截面积,分组编号的第一部分RC代表钢筋混凝土承台,SC代表型钢混凝土承台;第二部分的数字“28”代表承台高度,即2.8 m;第三部分“0.5b”代表下弦杆的钢板厚度为“SC-28”模型的0.5倍,“0.5d”代表斜撑杆的钢板厚度为“SC-28”模型的0.5倍;第三部分“C45”代表承台混凝土强度为C45。其中RC-28用于研究钢筋混凝土承台,SC-28、SC-23、SC-18和SC-15用于研究新型承台高度对承载能力的影响,SC-28-0.5b、SC-28-0.75b、SC-28-0.5d和SC-28-0.75d则在SC-28承台高度相同的基础上研究型钢下弦杆、斜撑杆截面积对承载能力的影响。SC-28-C45、SC-28-C40、SC-28-C35则在SC-28承台尺寸相同的基础上研究混凝土强度对承载能力的影响。

如图3所示,模拟中承台混凝土部分采用线性减缩积分实体单元(C3D8R),型钢板件采用线性减缩积分板壳单元(S4R),钢筋通过线性桁架单元(T3D2)模拟。型钢桁架各杆件通过节点绑定(tie)连接,型钢桁架及型钢立柱内嵌(embedded region)于混凝土中。使用准静态加载,显式求解,荷载通过在

表1 有限元模型分组

编号	埋置件	承台高度/m	下弦杆截面面积/cm ²	斜撑杆截面面积/cm ²	混凝土强度等级	普通钢筋配筋率/%	桩径/m
RC-28	—	2.8	—	—	C50	—	—
SC-28	型钢	2.8	163	29	C50	0.42	1.8
SC-23	型钢	2.3	163	29	C50	0.42	1.8
SC-18	型钢	1.8	163	29	C50	0.42	1.8
SC-15	型钢	1.5	163	29	C50	0.42	1.8
SC-28-0.5b	型钢	2.8	82	29	C50	0.42	1.8
SC-28-0.75b	型钢	2.8	122	29	C50	0.42	1.8
SC-28-0.5d	型钢	2.8	163	15	C50	0.42	1.8
SC-28-0.75d	型钢	2.8	163	22	C50	0.42	1.8
SC-28-C45	型钢	2.8	163	29	C45	0.42	1.8
SC-28-C40	型钢	2.8	163	29	C40	0.42	1.8
SC-28-C35	型钢	2.8	163	29	C35	0.42	1.8

参考点 RP-1 处的 50 mm 位移施加,桩底边界条件为设立在参考点 RP-2 和 RP-3 的简支约束。



2.2 材料本构

有限元计算中假定的混凝土应力-应变曲线见图4,依照欧洲规范 Eurocode2,模拟混凝土行为时采用了损伤塑性模型,混凝土等级取 C50,弹性模量为 3.15×10^4 MPa,泊松比为 0.2。混凝土受拉本构在开裂前假定为线性,采用与受压状态相同的弹性模量表征应力-应变关系,其中: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度,取为 50 MPa; f_t 为混凝土轴心抗拉强度,取为 4 MPa; $\varepsilon_{ik}=0.000\ 1$,为混凝土开裂应变; $\beta=30$ 。

$$\sigma = E_{cm} \varepsilon_c, \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq 0.4 f_{ck} / E_{cm} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{kn - n^2}{1 + (kn - 2n)} f_{ck}, \quad 0.4 f_{ck} / E_{cm} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1} \tag{2}$$

$$\sigma = \left(1 - 0.15 \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c1}}\right) f_{ck}, \quad \varepsilon_{c1} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \tag{3}$$

$$E_{cm} = 9.5 (f_{ck} + 8)^{1/3} \tag{4}$$

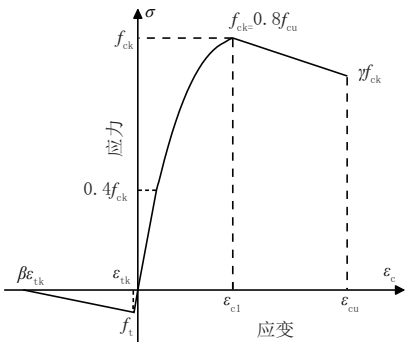


图4 混凝土应力-应变曲线

式中: $n=\varepsilon_c/\varepsilon_{c1}$, $k=1.1E_{cm}\varepsilon_{c1}/f_{ck}$, $\varepsilon_{cu}=0.005\ 5$, $\varepsilon_{c1}=0.002\ 5$, $r=0.85$ 。

钢材本构曲线见图5,采用简化二折线本构模型。其中,普通钢筋屈服应力 σ_{ys} 取 400 MPa,钢板屈服应力 σ_{ys} 取 420 MPa,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3。 ε_{ys} 与 ε_{us} 分别代表屈服应变与极限应变,其中 $\varepsilon_{ys}=0.002$, $\varepsilon_{us}=0.01$ 。

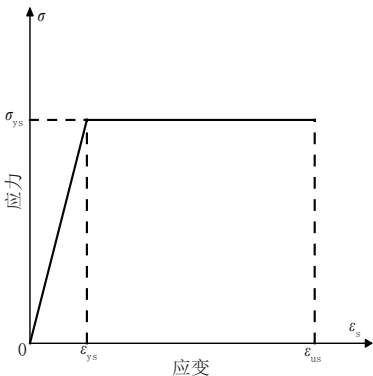


图5 钢材本构模型

3 计算结果及分析

3.1 破坏过程

传统钢筋混凝土承台以 RC-28 为例(见图6),接近塑性破坏阶段时,超过 ε_{cu} 的塑性应变区域发生在梁跨的墩柱加载区域内,沿试件模型高度发展至 88.9% 后沿斜向 45° 延伸至承台顶部柱脚,大塑性应变区域集中在梁跨中 0.3 m 宽度区域。混凝土超过弹性阶段后,裂缝在承台底部跨中位置出现,并逐渐向上延伸并变宽,直至贯通,沿承台长边方向发生混凝土的剪切破坏。

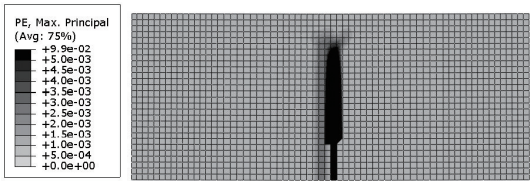


图6 普通承台破坏应力云图

型钢承台各尺寸试件模型破坏过程基本一致,以 SC-28 为例进行分析。如图7所示,随荷载逐步增

加,承台内下弦杆先发生屈服,承台挠度增大,塑性区域起点距弦杆中点 0.9 m,沿 45°发展至下弦杆与工字钢翼缘连接节点。随后斜撑杆及上弦杆距弦杆中点 0.9 m 处先后发生屈服,型钢构件发生扭曲变形,力传递至由混凝土承担,并产生位于型钢工字钢腹板处的横向裂缝。

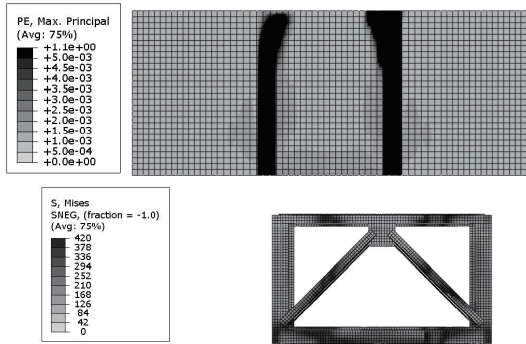


图 7 型钢承台破坏应力云图

距跨中 0.9 m 位置为柱脚至桩顶的连线区域,钢结构发生屈服后退出工作,大塑性应变区域集中在柱脚至桩顶连线区域宽度为 0.3 m 的区域内。承台逐渐发展出桩顶裂缝,向承台底部两侧延伸扩展至承台侧面,形成横向长裂缝。2 条长裂缝沿柱脚-桩顶连线自承台底部延伸至承台中部,于承台顶部贯通。混凝土部分产生剪切破坏,钢材达到屈服,表现为剪切破坏状态。

3.2 荷载-位移关系

图 8 给出了 RC-28 和 SC-28 两个模型的荷载-位移曲线,取峰值荷载 F_{max} 为承台极限承载力,由此得到:对于混凝土高度相同的厚承台结构,型钢组合结构承台 SC-28 相比钢筋混凝土承台 RC-28 极限承载力提高了 276%。

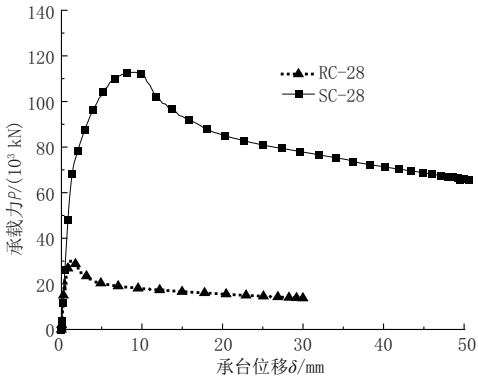


图 8 RC-28、SC-28 承台荷载-位移曲线图

3.3 承载性能分析

3.3.1 下弦杆截面积的影响

为研究下弦杆尺寸对承载力的贡献,图 9 至图 11 分别给出不同下弦杆截面尺寸的 SC-28 承台荷

载-位移曲线、承载力的变化图、初始刚度的变化图,其中初始刚度为试件弹性阶段的平均刚度大小,通过 Park 法^[18]选取荷载-位移曲线名义屈服点计算试件屈服荷载与屈服位移之比。可以看出:承台下弦杆截面积从 82 cm²提高至 163 cm²后极限承载力提高 39%。而初始刚度提高 3%。由此可见,下弦杆尺寸对承载力的影响较大,而对承台的初始刚度变化影响较小。

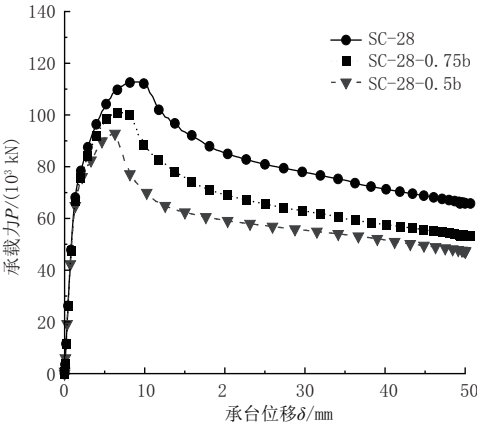


图 9 不同下弦杆尺寸承台荷载-位移曲线图

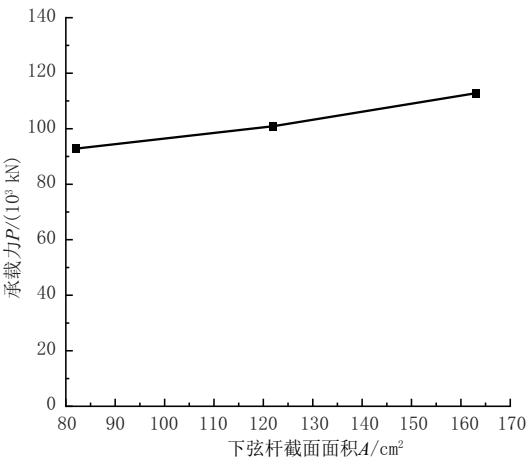


图 10 承载力随下弦杆截面面积变化图

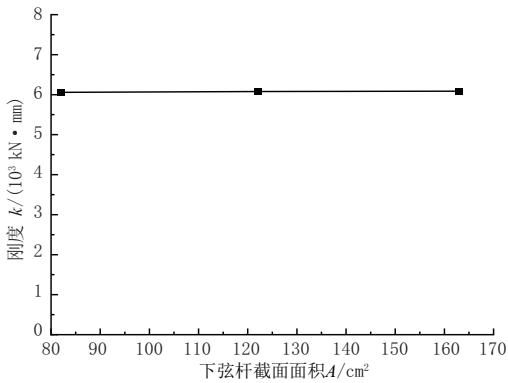


图 11 承台刚度随下弦杆截面面积变化图

3.3.2 斜撑杆截面积的影响

为研究斜撑杆尺寸对承载力的贡献,图 12 至图

14分别给出不同斜撑杆截面尺寸的SC-28承台荷载-位移曲线、承载力的变化图、初始刚度的变化图,可以看出:承台斜撑杆截面积从 15 cm^2 提高至 29 cm^2 后极限承载力提高4%,而初始刚度提高3%。由此可见,斜撑杆尺寸对承台承载力和初始刚度影响均较小。

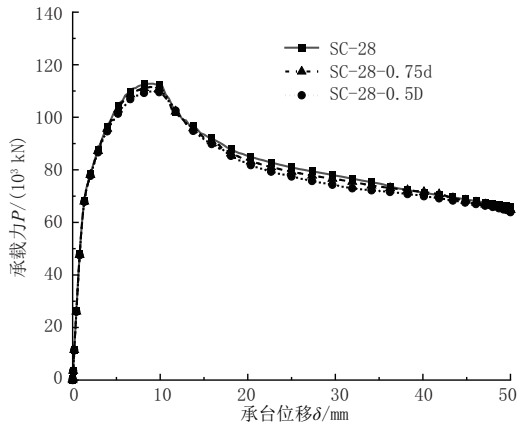


图12 不同斜撑杆尺寸承台荷载-位移曲线图

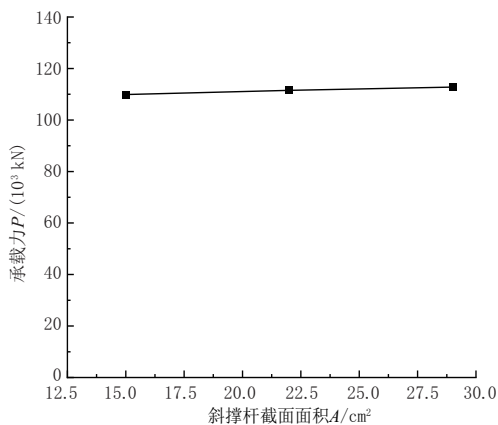


图13 承载力随斜撑杆截面积变化图

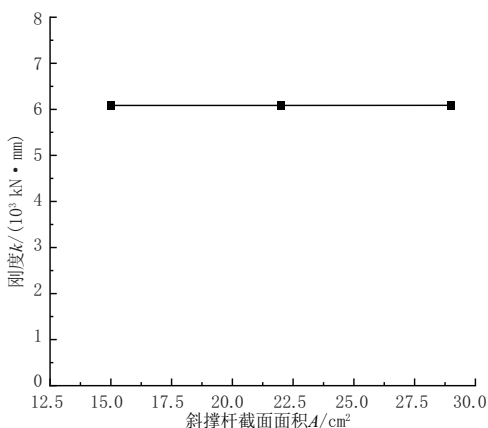


图14 承台刚度随斜撑杆截面积变化图

3.3.3 承台高度的影响

为研究不同承台高度对承载力的影响,图15至图17分别给出承台高度为280、230、180、150 cm的SC承台的荷载-位移曲线、承载力的变化图、初始刚度的变化图,其中:SC-23、SC-18、SC-15承台承载力

相比SC-28分别下降了13.8%、33.1%、42.9%,初始刚度下降9.8%、23.5%、40.1%。可见随着承台高度的下降,承台承载力及刚度基本呈线性下降。

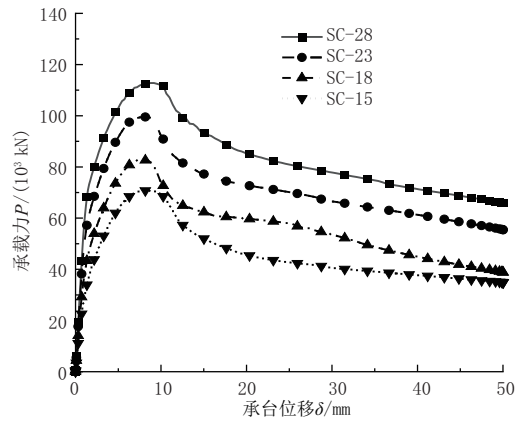


图15 不同斜撑杆尺寸承台荷载-位移曲线图

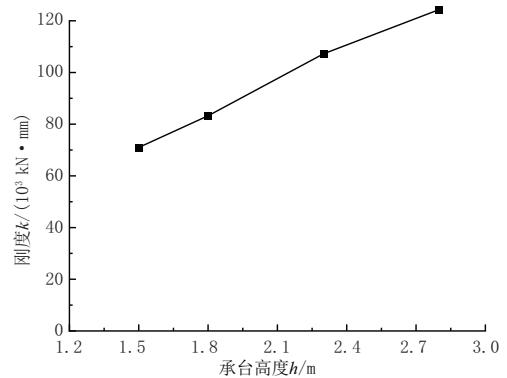


图16 承载力随斜撑杆截面积变化图

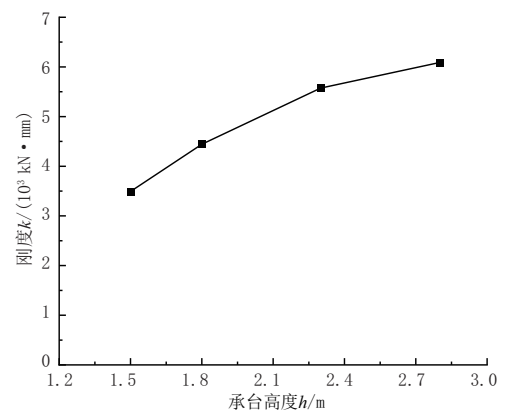


图17 承台刚度随斜撑杆截面积变化图

3.3.4 混凝土强度

为研究不同混凝土强度对承载力的影响,图18至图20分别给出不同混凝土强度的SC-28承台荷载-位移曲线、承载力的变化图、初始刚度的变化图,可以看出:混凝土强度等级从C35提高至C50后极限承载力提高2%,而初始刚度提高1%。由此可见,混凝土强度等级几乎对承载性能基本不产生影响。承台的承载力主要由型钢及普通钢筋提供。

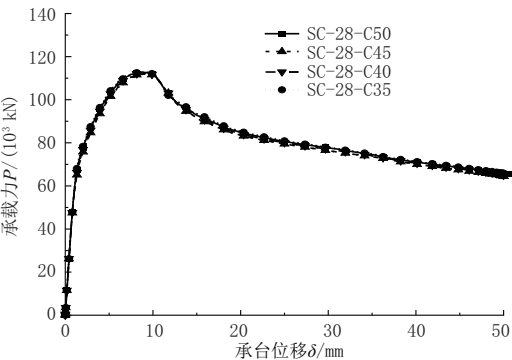


图 18 不同斜撑杆尺寸承台荷载-位移曲线图

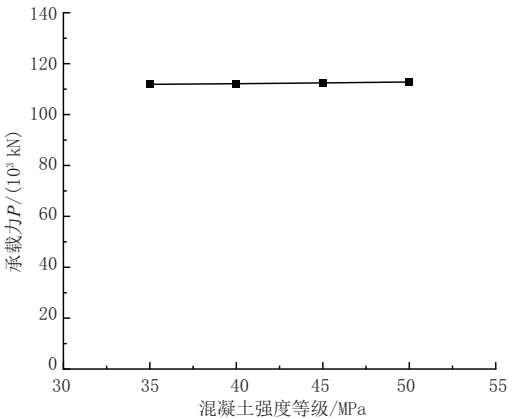


图 19 承载力随斜撑杆截面面积变化图

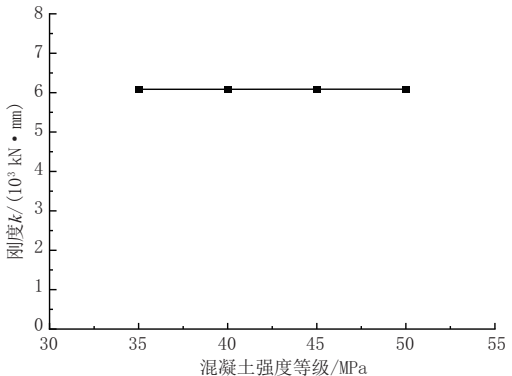


图 20 承台刚度随斜撑杆截面面积变化图

4 新型承台计算方法研究

4.1 基本假定

采用拉压杆模型开展理论分析(见图 21)。

(1)压杆轴向受压,拉杆轴向受拉,连接拉杆和压杆的结点不承受弯矩。

(2)由于受力钢筋的作用在结点区域产生拉应变,混凝土的抗压强度将降低。混凝土压杆及其端部的压应力取决于混凝土的有效抗压强度。

4.2 理论模型

承台由下弦杆、斜撑杆组成K字形桁架模型,上弦杆、工字钢为结构构件。其中,下弦杆及其底部受弯钢筋构成了拉杆,主要应力沿杆的中心线方向,应力域形状通常理想化为棱柱形,应力均匀式分布。

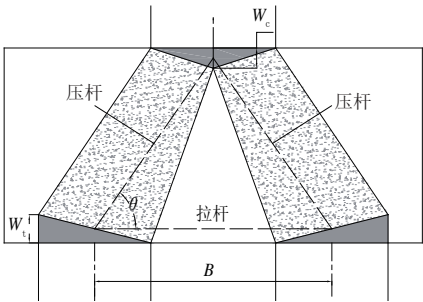


图 21 新型承台的拉压杆模型

由于型钢构件的存在等效于加强配筋,拉杆上的有效承载力为:

$$F_{tu} = A_t f_{tu} + A_s f_y \tag{4}$$

式中: $A_t = w_t t$ 为拉杆有效横截面面积; w_t 为拉杆节点区宽度,依研究取为型钢下弦杆形心距承台底部距离的2倍; t 为拉杆厚度,通常取为承台宽度减去混凝土保护层厚度; f_{tu} 为受拉区钢筋混凝土等效抗拉强度; A_s 和 f_y 为型钢下弦杆的横截面面积和屈服强度。

对于高跨比大于1/4的厚承台,适用于深梁模型。通常认为当拉杆达到屈服破坏时,承台抵抗机制就达到其最大承载能力。

$$w_c = \frac{F_{tu}}{0.85 \eta b f_c} \tag{5}$$

式中: b 为节点有效宽度,取为承台宽度; f_c 为混凝土抗压强度; η 为应力传递形状系数,各研究指出的适用于厚承台扇形传力模式的系数值均不相同,依研究^[19]取为0.6。

由此可得拉、压杆形成倾角正切值 $\tan \theta$:

$$\tan \theta = \frac{2h - w_c - w_t}{B} \tag{6}$$

式中: B 为桩基中心距。

如图 22 所示, $\tan \theta$ 取值与承台高度基本呈线性相关,而与型钢下弦杆截面面积相关性较小,故可按下式取值:

$$\tan \theta = 0.52h - 0.34 \tag{7}$$

式中: h 为承台高度,m。

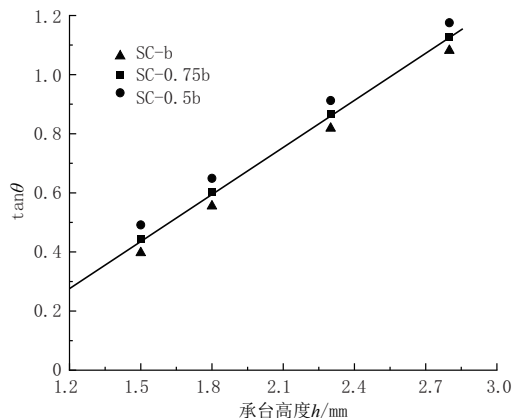
得到理论公式:

$$P = 2F_{cu} \tan \theta = (w_c f_{tu} + A_s f_y)(1.04h - 0.68)/B \tag{8}$$

4.3 计算方法验证

通过提出的新型型钢组合承台承载力的计算方法得到的新型型钢混凝土组合结构承台承载力与数值模拟得到的承载力见表 2。

提出的新型型钢组合承台承载力的计算方法通过有限元计算结果验证见图 23:有限元结果/理论计算结果的比值均在斜率为1的直线上方,这是由于

图22 $\tan\theta$ 取值分布

编号	有限元结果/ (10^3 kN)	理论计算结果/ (10^3 kN)	比值
SC-28	112.81	117.99	0.96
SC-23	101.25	86.29	1.17
SC-18	83.26	64.59	1.29
SC-15	71.00	51.57	1.38
SC-28-0.5b	90.11	72.40	1.24
SC-28-0.75b	107.23	90.00	1.19
SC-28-0.5d	111.56	108.00	1.03
SC-28-0.75d	111.45	108.00	1.03

忽略了钢筋的受拉能力,以及型钢构件对节点厚度有一定扩散增强作用,能使得更多面积的混凝土参与等效杆件的受力中去,理论公式实际上给得较为保守。故增加修正系数 α ,取 $\alpha=1.2$,平均误差为1.5%,标准差为0.005。

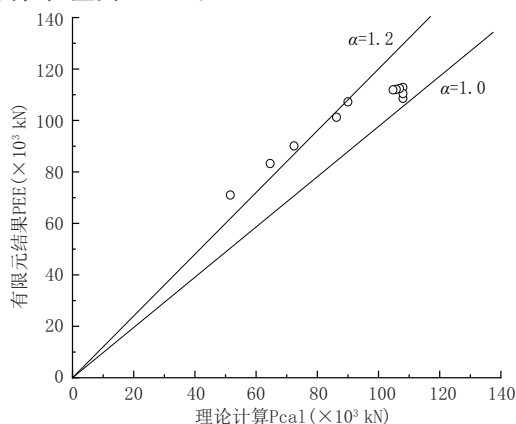


图23 计算结果验证对比

$$P = 2\alpha F_{cu} \tan \theta = (w_c f_c + A_s f_y)(1.04h - 0.68)\alpha/B \quad (9)$$

5 结 语

(1)提出了一类新型型钢组合结构承台,通过预埋的型钢承力,可以有效提高承台的承载力,达成削减承台混凝土高度的目的。

(2)本文计算的有限元模型中,使用型钢混凝土组合结构承台可以使承载力提高2.76倍,下弦杆截面积与承台高度对承载力的贡献较大。

(3)型钢混凝土组合结构承台发生剪切破坏,斜向长裂缝自承台底部延伸至承台中部,于承台底部贯通,钢材达到屈服。

(4)提出了预测型钢混凝土组合结构承台承载力的计算公式,考虑了型钢下弦杆截面面积与承台高度,并通过有限元计算结果进行了验证,平均误差为1.5%,标准差为0.005。

参考文献:

- [1] Perry Adebar, Daniel Kuchma, Michael P. Collins. Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps--An Experimental Study[J]. Aci Structural Journal, 1990, 87(1): 81-92.
- [2] Ridha B, Kamel G, Laid M S. A new simplified approach for predicting the bearing capacity of rectangular concrete four-pile caps[J]. Engineering Structures, 2023, 293.
- [3] Guo Honglei. Evaluation of Column Load for Generally Uniform Grid-Reinforced Pile Cap Failing in Punching[J]. Aci Structural Journal, 2015, 112(2): 123-134.
- [4] 陈愿刚. 基于拉压杆模型理论方法的多桩基承台冲切试验分析[J]. 南通职业大学学报, 2025, 39(3): 98-104.
- [5] 童敏. 钢筋混凝土厚承台传力机理试验研究和理论分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [6] 季静, 吴仁培. 厚桩承台承载力的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1995(3): 91-97.
- [7] 蒋大骅, 沈景华. 柱下桩基承台的抗弯强度计算[J]. 结构工程师, 1986(1): 11-18.
- [8] 黄明海. 双柱墩式桩基承台抗弯分析研究[J]. 工程建设与设计, 2021(16): 19-21; 55.
- [9] 雷杰, 陈子夏, 史科, 等. 钢纤维高强混凝土二桩承台受剪性能及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 234-245.
- [10] 王武刚, 陈子夏, 张国栋, 等. 钢纤维高强混凝土二桩厚承台裂缝及破坏形式分析[J]. 江西建材, 2022(4): 197-199.
- [11] 邱宏禧, 陈子夏, 张熙. 钢纤维高强混凝土二桩承台受力特性有限元分析[J]. 水利水电快报, 2024, 45(1): 64-69.
- [12] 孙成访, 谷倩, 彭少民. 钢纤维混凝土二桩厚承台试验研究[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集, 2008.
- [13] 孙成访, 王敏根, 谷倩, 等. 钢纤维混凝土二桩厚承台冲切、剪切承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004(1): 107-113; 128.
- [14] 谢海兵. 高轴力柱下两桩承台优化设计分析[J]. 四川水泥, 2023(10): 129-131.
- [15] 孙延辉. 群桩基础厚承台受力特性研究[J]. 科学技术创新, 2022, (29): 140-143.
- [16] 李强, 刘志才, 戴少雄. 双薄壁墩承台拉压杆模型计算[J]. 城市道桥与防洪, 2013(5): 81-83.
- [17] 王雨权, 廖立坚, 苏伟, 等. 基于力流分析的铁路承台三维拉压杆模型研究[J]. 中国铁路, 2022(3): 43-48.
- [18] Park R. Structural assemblages from laboratory testing[J]. Bulletin of the New Zealand National Society For Earthquake Engineering, 1989, 22(3): 155-166.
- [19] 萨拉赫. 钢筋混凝土结构设计: 拉压杆模型[M]. 北京: 华中科技大学出版社, 2022.