

矩形墩柱承插式连接设计与承插深度研究

秘志辉

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 预制拼装桥墩采用承插式连接具有受力可靠与施工方便的特点,构造设计的关键是确定承插深度。以实际工程为例详细阐述承插深度的确定过程。基于国外房屋建筑中承插式连接计算方法,并结合桥梁立柱与承台之间竖向受力特点,提出承受压力-弯矩-剪力共同作用的桥墩承插式构造节点受力计算图示,推导了最小承插深度的计算方法;对不同工况下的设计荷载进行了参数对比分析,得到了荷载对最小承插深度的影响规律;为验证计算方法的可靠性开展了模型试验研究,结果表明采用合理承插深度时,承插试件与现浇试件的破坏模式相似,采用的承插构造能够为桥墩提供有效的锚固约束作用。

关键词: 预制拼装;承插连接;承插深度;计算方法;模型试验

中图分类号: U445.2;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0210-05

Research on Socket-type Connection Design and Socket Depth of Rectangular Pier Columns

MI Zhihui

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The precast assembled pier with socket-type connection has the characteristics of reliable force-bearing and convenient construction, and the key of the structural design is to determine the socket depth. Taking an actual project as an example, the determination process of the socket depth is elaborated in detail. Based on the calculation method of socket-type connection in foreign building constructions and combined with the vertical force-bearing characteristics between bridge columns and base slabs, a diagram of force calculation for the socket-type structural nodes of bridge piers subjected to the combined action of pressure, bending moment and shear force is proposed, and the calculation method for the minimum socket depth is derived. The parametric comparison and analyses of design loads under different working conditions are carried out to obtain the influence rules of loads on the minimum socket depth. The model test studies are conducted to verify the reliability of the calculation method. The tests show that when a reasonable socket depth is adopted, the failure modes of socket specimens are similar to those of cast-in-place specimens. The socket structure used in this project can provide effective anchoring and restraining effects for piers.

Keywords: prefabricated assembly; socket connection; socket depth; calculation method; model test

0 引言

预制拼装技术在桥梁建设中的应用已十分普遍,技术相当成熟,但是围绕构件轻量化和安装便捷快速的研究是一个永恒的课题。构件轻量化的现实需求使得需要将结构拆分成不同构件,将构件拆分成不同节段进行预制,现场再通过连接构造将节段及构件拼装成整体,安装便捷快速就要求连接形式在满足受力性能的前提下,构造尽量简单,施工简单快捷。上部结构通过预制节段梁^[1]和钢混组合梁^[2]

的研究,为轻量化提供了较好的途径。下部结构通过盖梁和立柱分段预制实现了构件轻量化^[3]。下部立柱的连接一直是研究的热点,常规的灌浆套筒连接技术成熟且受力性能好^[4],但对钢筋定位的精度要求高,施工便捷性相对较差,而承插式连接很好地兼具了各项特点^[5],并在美国SR520的公路桥、无锡凤翔快速路等实际工程中得以成功运用。

国内有关承插式连接的研究以抗震性能为主。齐新等^[6]基于不同承插深度的试件与现浇试件的拟静力试验结果对比,得出承插连接的墩柱能够达到与常规整体现浇墩柱等同的抗震性能。李航等^[7]同样对现浇和承插试件开展拟静力试验,并得出承插式桥墩与现浇桥墩试件破坏模式、损伤范围、承载能

收稿日期: 2025-05-23

作者简介: 秘志辉(1978—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁结构设计工作。

力、耗能能力、残余位移和钢筋应变沿梁高分布相近的结论。陈光伟等^[8]依托京沪高速公路江苏段改扩建项目,设计承插式连接和现浇连接桥墩的两种缩尺模型,进行拟静力试验对比研究。试验结果显示,承插式桥墩试件与现浇桥墩在滞回曲线形状、承载能力、耗能能力、残余位移、延性系数等相关抗震性能参数方面均非常接近,可认为近似等同现浇桥墩。李理等^[9]研究了高宽比等不同结构参数下的承插式立柱抗震性能,得出了影响规律。夏樟华等^[10]提出了一种灌浆套筒和承插式组合的连接方式,并对其抗震性能进行了对比试验。上述学者的研究中,试件的承插深度选取均基于当前研究认为的合理值,试验取值范围在 $0.8D\sim 1.0D$ (D 为桥墩直径)之间,在此基础上均得出承插式桥墩具有较好的抗震性能。

相比于抗震性能的研究,在承插式连接的静力研究中,特别是对关键参数承插深度的确定的问题上,还未形成共识。查阅大量研究资料,目前承插深度的理论研究和工程实践取值主要集中 $0.7D\sim 1.5D$ 之间。日本学者 Osanai^[11]建议承插深度至少应为 $1.5D$;华盛顿大学 Haraldsson^[12]建议承插深度至少应为 $1.0D$ 。徐艳等^[13]认为可参照嵌岩桩受力模式计算承插深度,并推荐 $0.7D$ 的承插深度可以作为最小承插深度。陈景丽等^[14]对圆形管墩的承插式连接的最小承插式深度进行了研究,通过对规范计算和试验结果的对比,进一步验证了规范计算的可靠性。对承插深度未形成共识的主要原因是承插构造的受力模型和理论计算公式未形成共识,诸多研究均基于特定的试验结论,因此差异性较大。

鉴于上述原因,葛继平等^[15]根据弯矩平衡给出了承插深度计算公式,考虑剪力键的构造后,进一步推导了考虑剪力键的承插深度计算公式。理论研究的关键是提出承载能力极限状态下的受力分析图,并通过一定的假设简化受力模型,从而得出计算公式。本文以无锡凤翔快速路为背景,针对新型承插式矩形墩柱进行了理论推导,分析了承插式最小深度的取值过程。

1 工程背景

无锡凤翔快速路(规划北外环—江阴界)工程中桥梁工程包括主线高架2座,主线高架桥第1段南侧与现状凤翔快速路相接,沿锡澄路向北依次跨越堰裕路、堰丰路等横向道路后在京沪高铁南侧落地。主线高架桥第2段于京沪高铁北侧起桥,沿锡澄路

向北跨越堰盛路、界河等道路、河流后与江阴段高架相接。高架桥梁总长约2.0 km。高架桥上部结构采用预制小箱梁,下部结构采用预制墩柱与预制盖梁,预制立柱与现浇承台的连接采用新型承插式构造连接,预制立柱与预制盖梁的连接采用金属波纹管连接。

标准等宽段(桥宽 $B=25.1\text{ m}$)下部结构采用双立柱构造,单个立柱尺寸为矩形截面,截面尺寸为 1.6 m (横桥向) $\times 1.8\text{ m}$ (顺桥向),立柱与盖梁均采用预制装配结构,盖梁横向分成两段进行预制,中间设置 1.5 m 现浇段。本工程预制立柱与现浇承台之间连接构造如图1所示。

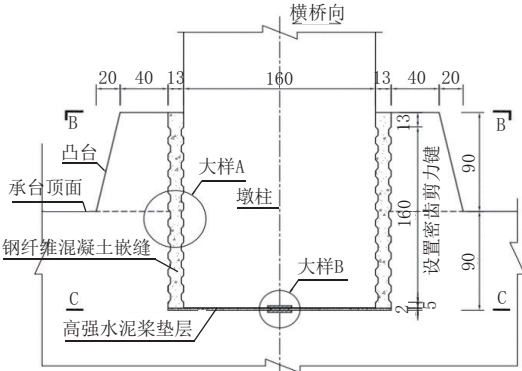


图1 承插式连接构造(单位:cm)

2 矩形墩柱承插式连接受力原理

日本建筑规范 AIJ 及德国混凝土设计规范 DIN 1045 对承插式连接构造节点受力计算进行了规定:对承插式节点计算只考虑水平力,未考虑轴力作用。两本规范对承插式节点总体计算模型是基本一致的:在水平力及弯矩共同作用下,节点上前端和下后端与承台之间挤压受力,通过两处承台对节点内的立柱产生的压力差抵抗水平外力,同时由两处压力产生的弯矩抵抗承台顶部的弯矩,从而形成抗力(见图2)。

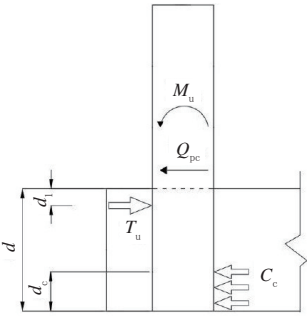


图2 AJJ 规范设计建议

M_u 和 Q_{pc} 分别为设计弯矩和设计水平力; d 为承插深度; T_u 和 C_c 分别为上前端和下后端与承台之间的挤压力; d_1 为上前端挤压力距离承台顶面的高度; d_c 为下后端承压区高度。

相对于上述承插式连接构造的计算图示,桥梁立柱与承台之间的承插式构造的不同在于竖向压力不可忽略。本文提出承受压力-弯矩-剪力共同作用的桥墩承插式构造节点受力计算图示如图3所示。

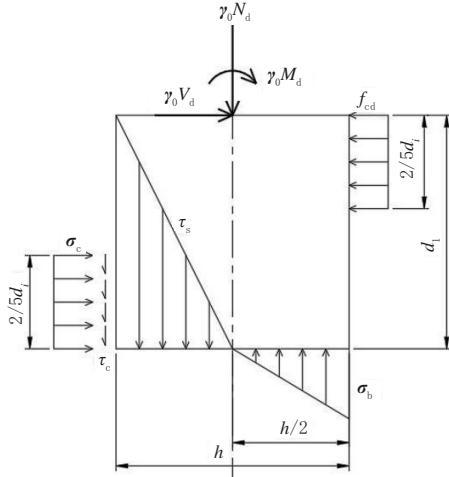


图3 本文推荐计算图示

M_d 、 N_d 、 V_d 分别为弯矩、轴力和剪力设计值; b 、 h 分别为承插截面宽度和高度; γ_0 为重要系数; d_i 为承插深度; δ_c 、 T_c 分别为下后端与承台之间的正应力和剪应力; T_s 为侧面剪应力设计值; δ_b 为底面受压区压应力最大值。

上述计算模式主要有如下假定:

(1)墩柱承插段与 V_d 作用方向垂直面上的受压区高度为相应截面高度的1/2。

(2)不计墩柱承插段与 V_d 作用方向垂直面上受拉区的受力作用。

(3)不计与 V_d 作用方向垂直的墩柱承插段前侧(上前端)受压区上的剪应力,该受压区上正应力的等效均布高度与受压区高度之比为0.8,正应力达到相应的抗压强度设计值。

(4)与 V_d 作用方向垂直的墩柱插入段后侧(下后端)受压区上等效均布正应力和向下作用剪应力的等效均布高度与受压区高度之比为0.8,等效均布的正应力和剪应力达到相应二维应力强度设计值。

(5)不计墩柱插入段与 V_d 作用方向平行的两个侧面上的正应力,该侧面上的剪应力在对应插入段底面受拉区的范围内线性分布、向下作用,其最大值达到抗剪强度设计值。

(6)墩柱插入段底面受压区的正应力按线性分布,不计该受压区的剪应力。

根据上述假定及三个平衡条件,得到承插式连接所需的抗力设计值应满足的条件如下:

$$N_{ud} = \frac{1}{4} \sigma_b b h - \frac{2}{5} \tau_c b d_i - \frac{1}{2} \tau_s d_i h \quad (1)$$

$$V_{ud} = \frac{2}{5} f_{cd} b d_i - \frac{2}{5} \sigma_c b d_i \quad (2)$$

$$M_{ud} = -\frac{2}{25} f_{cd} b d_i^2 + \frac{8}{25} \sigma_c b d_i^2 + \frac{1}{5} \tau_c b d_i h + \frac{1}{12} \sigma_b b h^2 + \frac{1}{6} \tau_s d_i h^2 \quad (3)$$

式中: M_{ud} 、 N_{ud} 、 V_{ud} 分别为墩柱在承台顶面截面的抗力设计值。 σ_c 和 τ_c 之间的二维应力强度准则方程采用如下简化形式:

$$\frac{\tau_c}{f_{cd}} = \phi_j \left(a_i \frac{\sigma_c}{f_{cd}} + b_i \right) \quad (4)$$

联立上述四个方程可得到:

$$\frac{6}{25} f_{cd} b d_i^2 + d_i \left[\frac{1}{3} \phi_j f_{cd} b h (a_i + b_i) - \frac{4}{5} V_{ud} + \frac{1}{3} \tau_s h^2 \right] + \frac{1}{3} h N_{ud} - \frac{5}{6} \phi_j a_i h V_{ud} - M_{ud} = 0 \quad (5)$$

该方程为关于承插深度的一元二次方程,可以求解该方程得到承插深度。

3 承插深度设计

3.1 承插深度的确定

根据上述关于承插深度的计算公式,在给定立柱材料、立柱尺寸和设计荷载的情况下,可以计算出对应的最小承插深度。关于设计荷载的选取,可以有两种思路:(1)按照实际受力情况计算得到荷载设计值;(2)按照承插式连接与整体式现浇立柱等强度设计原则。采用第二种设计思路,理论上可以保证立柱极限破坏状态与现浇结构一致。

为了确定凤翔快速路工程的合理承插深度,首先对不同设计荷载水平与承插深度的关系进行研究。凤翔快速路工程标准段立柱采用1.6 m(横桥向 b) $\times$ 1.8 m(顺桥向 h),标准墩高 $H=8$ m,混凝土强度等级为C40,通过计算承台顶面静力计算设计荷载为: $N=12\,344$ kN, $V=500$ kN, $M=4\,200$ kN·m。按照整体现浇结构对立柱底部进行配筋设计,柱底单面配筋为16根直径32 mm的钢筋。该种配筋下截面可提供的正截面抗弯承载能力约为7 000 kN·m,而该截面在受压区高度达到界限高度时的极限承载能力约为34 000 kN·m。

本次研究根据竖向荷载取值考虑了三种荷载工况:(1)竖向荷载为最大设计荷载,即 $N=12\,344$ kN;(2)竖向荷载最小即仅考虑恒载标准值,即 $N=6\,000$ kN;(3)竖向荷载 $N=0$ kN。在三种工况下,分别计算了 $M=4\,000\sim 34\,000$ kN·m(墩高 $H=8$ m时对应的剪力 $V=500\sim 4\,250$ kN)的最小承插深度,计算结果详见表1。

表 1 最小承插深度计算结果

序号	V/kN	M/ (kN·m)	最小承插深度 d/mm		
			N=12 344 kN	N=6 000 kN	N=0
1	500	4 000	0	91	600
2	750	6 000	0	420	773
3	1 000	8 000	138	636	922
4	1 250	10 000	443	808	1 055
5	1 500	12 000	654	957	1 178
6	1 750	14 000	828	1 090	1 292
7	2 000	16 000	978	1 212	1 399
8	2 250	18 000	1 112	1 326	1 501
9	2 500	20 000	1 235	1 433	1 598
10	2 750	22 000	1 350	1 535	1 692
11	3 000	24 000	1 458	1 632	1 781
12	3 250	26 000	1 560	1 725	1 868
13	3 500	28 000	1 657	1 815	1 953
14	3 750	30 000	1 751	1 902	2 035
15	4 000	32 000	1 841	1 986	2 114
16	4 250	34 000	1 929	2 068	2 192

为便于直观表达最小承插深度与设计荷载的关系,将表 1 中的计算结果绘成最小承插深度-设计荷载关系图,其中荷载以弯矩为变量,如图 4 所示。

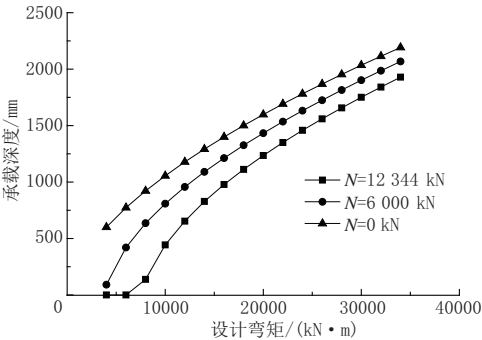


图 4 最小承插深度-设计荷载关系

在立柱材料、立柱尺寸一定的情况下,设计荷载是影响承插深度取值最主要的参数,对上述三种工况进行分析,不同设计荷载下的最小承插深度如图 4 所示。由图 4 可知:(1)在竖向荷载一定的情况下,随着横向剪力及弯矩同比例增加,最小承插深度增大;(2)在竖向荷载减小的情况下,对应的最小承插深度增加;(3)在竖向荷载较大、弯矩及剪力较小时,即第一种工况出现了方程无解的情况,此时应为竖向承压破坏,本文提出的计算图示不再适用。

凤翔快速路工程该类桥墩在上述配筋及受力状态下,按照最不利考虑,即 N 仅考虑恒载, M 取设计配筋下的正截面抗弯承载能力值,承插深度取 536 mm 即可满足静力状态下,柱底抗弯破坏先于承插式连接破坏出现。

考虑地震状态下的受力时,经计算 E1 作用下柱底

弯矩设计值为 $M=5\,450\text{ kN}\cdot\text{m}$ (对应剪力 $V=681.25\text{ kN}$), E2 作用下柱底弯矩设计值为 $M=19\,660\text{ kN}\cdot\text{m}$ (对应剪力 $V=2\,457.5\text{ kN}$),同样 N 仅考虑恒载,按 $M=19\,660\text{ kN}\cdot\text{m}$ 计算的承插深度为 1 415 mm,约为 $0.8D$ 。最终结合计算及国内外研究成果,凤翔快速路工程作为国内首次全线采用该新型承插式矩形墩柱构造设计的工程,承插深度采取了 $1.0D$ 即 1 800 mm。

3.2 实验验证

为验证承插式连接的可靠性,进行了模型试验研究,试验设计了 3 组缩尺模型,其中 S1 为常规现浇构件,作为基准用于与承插式连接的对比;S2 为嵌缝材料采用钢纤维混凝土的承插试件,承插深度为 $1.0D$;S3 为嵌缝材料采用钢纤维混凝土承插试件,承插深度为 $0.8D$ 。



图 5 试件破坏形态

承插试件与现浇试件的破坏模式相似,即破坏区域均集中在墩底部位,嵌缝部位和承台存在局部开裂现象但未见明显损伤,这说明本次试验的承插构造($0.8D\sim 1.0D$ 的承插深度且采用钢纤维混凝土作为嵌缝材料)能够为桥墩提供有效的锚固约束作用。详细试验结果数据及结论已在齐新等^[6]的研究成果中,此处不再赘述。

4 结 语

(1)提出承受压力-弯矩-剪力共同作用的桥墩承插式构造节点受力计算图示与计算公式,该计算方法受力机制明确,适用性强。

(2)通过参数分析得到:竖向荷载一定的情况下,随着横向剪力及弯矩同比例增加,最小承插深度增大;在竖向荷载减小的情况下,对应的最小承插深度增加。

(3)模型试验表明:采用合理承插深度时,承插试件与现浇试件的破坏模式相似,本工程采用的承插构造能够为桥墩提供有效的锚固约束作用。

参考文献:

[1] 吴东升,卢永成,任才.城市高架变宽预制节段梁结构设计与关键技术研究[J].桥梁建设,2021,51(6):99-105.

- [2] 卢永成,俞明德.城市桥梁钢-混凝土组合梁技术与应用[J].上海公路,2024(2):50-54;98.
- [3] 杨炜,任才.预制装配式盖梁在无锡凤翔路高架桥中的应用[J].城市道桥与防洪,2019(11):121-124.
- [4] 王瑞龙,马磊,黄虹.灌浆套筒连接装配式桥墩建设思考及对策研究[J].城市道桥与防洪,2021,217(4):63-65.
- [5] 徐艳,曾增,王志强,等.承插式桥墩连接构造及其力学行为的研究进展[J].土木工程学报,2023,56(1):90-108.
- [6] 齐新,卢永成,邵长宇,等.新型承插式矩形墩柱的抗震性能研究[J].桥梁建设,2022,5(2):39-46.
- [7] 李航,刘朵,王阳春,等.承插式连接预制拼装桥墩抗震性能试验研究[J].桥梁建设,2024,54(1):95-102.
- [8] 陈光伟,傅晨曦,曾慈航.承插式连接钢筋混凝土桥墩力学性能研究[J].公路,2023(6):241-247.
- [9] 李理,徐传昶,熊辉,等.承插式预制混凝土桥墩抗震性能试验与数值模拟[J].地震工程与工程振动,2023,43(5):213-220.
- [10] 夏樟华,谢君,范千,等.压弯扭作用下新型承插装配式桥墩的抗震性能[J].振动与冲击,2024,43(12):118-130.
- [11] Osanai Y, Watanabe F, Okamoto S. Stress Transfer Mechanism of Socket Base Connection with Precast Concrete Column[J]. Journal of Structural & Construction Engineering, 1996, 93(3):107-114.
- [12] Haraldsson O S, Janes T M, Eberhard M O, et al. Seismic Resistance of Socket Connection between Footing and Precast Column [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(9): 910-919.
- [13] 徐艳,曾增,葛继平,等.承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1706-1711.
- [14] 陈景丽,肖锋,王志刚,等.圆形管墩-承台承插式连接承插深度计算[J].中外公路,2025,45(1):146-152.
- [15] 葛继平,赖路奇,王志刚.改进承插式连接桥墩与承台的承插深度分析[J].中外公路,2023,43(2):74-79.

(上接第209页)

题,施工阶段及运营阶段各项计算结果均满足规范要求。

(3)本桥采用分幅设计,同步平行转体,转体吨位大,施工精度要求高。采用非对称转体设计,将两幅桥转体后的梁体端部位置均控制在铁路限界以外,最大程度的减少了施工过程对既有线的影响。

(4)本桥为城市桥梁,转体临时措施的可拆卸设计,使临时措施的拆除更加快捷高效。在满足城市景观要求的前提下,达到了绿色环保的效果。

参考文献:

- [1] 王东.海青铁路跨胶济客运专线(40+64+40)m连续梁转体施工设计[J].铁道标准设计,2014,58(5):81-85.
- [2] 井江永.(50+85+50)m跨铁路连续梁不对称转体设计研究[J].铁道标准设计,2018,62(9):67-71.
- [3] 米孝生,汪杰.(82.5+82.5)m变宽、变高T构上跨铁路非对称转体总体设计[J].特种结构,2024,41(5):81-86.
- [4] 贾宝红.郑万铁路上跨郑西客专联络线特大桥主桥转体结构分析[J].铁道标准设计,2017,61(5):65-69.
- [5] 刘润舟.(70+125+70)m跨铁路转体连续梁桥设计[J].铁道标准设计,2013(12):67-70.
- [6] 陈洪涛.高速公路改扩建上跨铁路非对称转体桥梁设计[J].世界桥梁,2022,50(2):20-25.
- [7] 邹永伟,李辉,徐升桥.铁路连续梁墩顶转体技术研究与应用[J].铁道标准设计,2020,64(增刊1):200-203.
- [8] 马行川.跨线桥转体技术发展现状与展望[J].铁道标准设计,2020,64(6):92-97.
- [9] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [11] 涂杨志.跨武广特大桥转体连续梁设计[J].铁道工程学报,2012,29(11):43-48.
- [12] 尚海涛.平转法转体在铁路桥梁施工中的应用研究[J].铁道工程学报,2013,30(1):29-34;84.
- [13] 高庚元.武汉市姑嫂树路跨铁路立交桥高位转体施工技术[J].铁道建筑,2017(6):44-48.