

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.02.013

# 改进承插式连接桥墩与承台的承插深度分析

葛继平<sup>1</sup>, 赖路奇<sup>1</sup>, 王志刚<sup>2</sup>

(1. 上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海市 201418;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**传统装配式承插桥墩因为要求承插深度较深,导致工程应用有限。该文提出改进承插式的拼装构造,包括侧面剪力键、墩底U形抗冲切钢筋、高强无收缩灌浆料、大直径金属波纹管约束等措施。列举了当前的承插式深度计算公式,并在此基础上提出改进承插式桥墩承插深度计算公式。讨论了轴压比、混凝土强度等因素对承插深度的影响。分析表明:改进承插式连接使承插深度减小,降低了承台厚度,拓宽了工程应用范围;在荷载等级不高的非抗震区,承插深度可达到0.7倍墩柱直径;剪力键构造对承插式抗弯贡献了20%。轴力偏心距小于0.5倍墩柱直径时,轴力对承插式构造抗弯是有利的;当偏心距大于0.5倍墩柱直径时,需要适当增加埋置深度。增大混凝土强度,可降低承插深度要求。

**关键词:**装配式桥梁;承插式连接;承插深度;公式推导

**中图分类号:**U443.2

**文献标志码:**A

## 0 引言

承插式连接是一种历史悠久的装配式连接技术,是将构件的一端插入另一个构件的凹槽或孔洞中形成的一种构造。早期木结构的卯榫结构可认为是一种承插式构思的雏形。现代土木工程中杯口承插式,广泛应用于排架墩与承台或工业厂房框架柱中。传统承插式适用于承插柱截面尺寸不大、基础底板较厚的场合。随着土木工程发展进入到新的发展时期,装配式桥墩结构成为交通基础设施的发展方向,对承插式连接也提出了新的要求<sup>[1]</sup>。

关于承插式连接的应用,国内外都有先例。20世纪中叶,中国铁路小桥中曾大量采用承插式排架墩。1992年9月竣工的北京积水潭桥试验工程是中国较早完成的公路装配式桥墩工程。2013年,美国华盛顿州SR520公路的5号公路桥梁采用了承插式连接技术<sup>[2]</sup>。2016年,上海嘉闵高架北二段桥梁其中一座匝道桥中采用了承插式连接构造<sup>[3]</sup>。2019年,北京工业大学等针对京雄高速公路北京段高架桥,采

用了承插式预制桥墩连接技术。中国一些设计院也较早进行了不少承插式的离心管墩工程的实践<sup>[4]</sup>。

对于承插式连接深度,国内外不少学者均展开了相关研究,针对不同的应用场合和不同的构造措施,承插深度的取值范围为 $0.7D \sim 1.5D$  ( $D$ 为桥墩直径)。传统侧壁光滑的承插式一般规定承插深度为 $1.5D$ 左右。1996年,日本Osana等<sup>[5]</sup>对建筑结构墩柱-基础Socket连接构造进行了拟静力试验研究,最终得出承插深度至少要满足 $1.5D$ 的结论;Mashal等<sup>[6]</sup>选取了一座位于新西兰跨径为16 m的高速公路桥梁为研究对象,最终得出当承插深度为 $1.0D$ 时,预制构件与整体现浇构件性能表现接近的结论。近年来许多学者对于混凝土侧壁采用剪力键的方式,进行了减小承插深度的研究,美国Halaldsson等<sup>[7]</sup>曾进行过 $1.1D$ 和 $0.5D$ 两种承插深度的试验研究,承插深度为 $0.5D$ 的侧壁剪力键方案承载力能够保持,但是刚度会下降,承台会发生破坏,因为没有在 $1.1D$ 和 $0.5D$ 之间进行更多工况承插深度的研究,所以偏于保守地建议承插深度大于 $1.1D$ ;Mohebbi等<sup>[8]</sup>通过振动台试验研究,建议方柱与盖梁和承台的承插连接

收稿日期:2021-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408360);上海应用技术大学中青年科技人才发展基金项目(编号:ZQ2021-28)

作者简介:葛继平,男,博士,副教授.E-mail:bridgejiping@126.com

深度分别为 $1.0D$ 和 $1.5D$ ,同时还需要满足纵筋最小锚固长度的要求;Sadeghian等<sup>[9]</sup>通过公式推导出了FRP管约束混凝土圆柱与混凝土基础承插式连接模型,得出了该构造的最小临界承插深度为 $0.7D$ ;徐艳等<sup>[4]</sup>对离心管墩进行了研究,建议承插深度不小于 $0.7D$ ;杨先凡<sup>[10]</sup>通过对矩形墩柱桩基础桥墩方案进行有限元分析,建议承插深度不小于 $0.7D$ ;贾俊峰<sup>[11]</sup>在研究京雄高速公路北京段高架桥工程中,采用了UHPC+大剪力键的方式,建议承插深度为 $0.8D$ 。

对于离心管墩,如何高效地进行承插式连接是本文重点关注的问题。本文首先分析传统承插式连接构造的受力特点,针对性地提出改进承插式连接构造方式。分析传统承插式构造的承插深度计算公式,建立改进承插式连接构造方式的承插深度计算公式,比较已有公式和本文提出公式计算结果的差异。同时分析轴力偏心距和混凝土强度对承插深度的影响规律。

## 1 改进承插式连接构造的提出

承插式杯口连接构造是在承台凹槽底部铺设一定厚度的砂浆、将预制墩身插入承台的预留孔内,桥墩与承台之间纵筋不连接。该连接构造优点是施工工序简单,施工容许误差较大,现场作业量少。对于传统承插式结构(图1)来说,承插接触的底面和侧面与承台之间无构造处理,属于光滑接触面,其抵抗转动的受力机理主要来自侧壁接触挤压力,为了保证墩柱与承台之间满足固结要求,保证连接部位不发生破坏,塑性铰的形成规律与现浇桥墩一致,墩柱承插深度要求达到1.5倍墩柱直径。现代桥梁建设在荷载等级、车道宽度、抗震要求、造价控制等方面提出了更高的要求。桥墩截面尺寸越来越大,按照传统承插式的构造要求,承台的厚度比现浇方案要增加很多,才能满足承插深度的要求,导致方案不合理,造价增大。另外,传统承插式连接也存在不抗拔的问题。相比其他连接方式,承插式连接的工程应用比例不大,只有通过其他构造手段控制承台深度才能让这种连接方式焕发新的生机。

为了提高连接抗弯承载力,对传统承插式进行改进,从而降低承插深度,可以从承插与承台接触的侧面入手(图2,图2中 $v_s$ 为剪力键的抗剪作用力)。

通过在桥墩插入部分和承台凹槽侧面接触面增设梯形锯齿剪力键,剪力键提供剪力来增大抵抗弯矩。为了发挥锯齿构造的作用,间隙采用高强度灌浆料填充且承台的锯齿采用一定厚度的大直径波纹管提高承台侧壁挤压力。

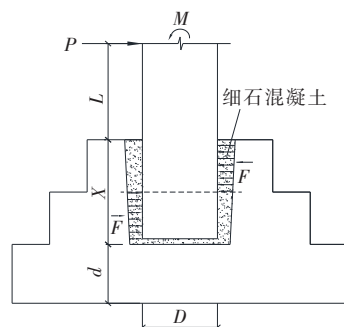


图1 传统承插式

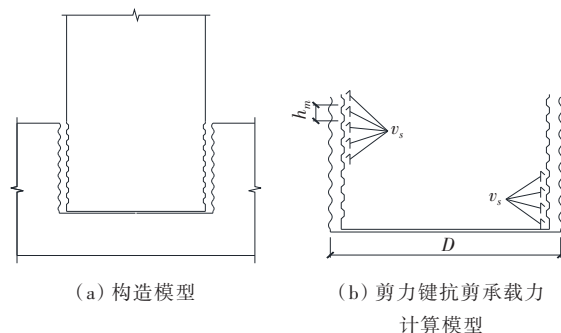


图2 从侧壁角度改进承插式连接

除了上述改进方法外,还可以从承插桥墩底部与承台凹槽底部的接触面入手,采取墩底底面与承台凹槽底板的增强接触构造(图3)。对于空心截面桥墩,采用承台底板预留插入钢筋,并在空心桥墩中灌入一定深度的内填芯混凝土,减少桥墩底板与承台底板之间相对滑移的趋势,从而增大抵抗矩,提高结构承载能力。同时对于离心管墩中,承台凹槽底部设置U形钢筋增大竖向承载力。并在空心管墩中内填部分混凝土的构造对于减小承插深度贡献也很大,主要原因是与承台凹槽侧壁对管墩的挤压约束

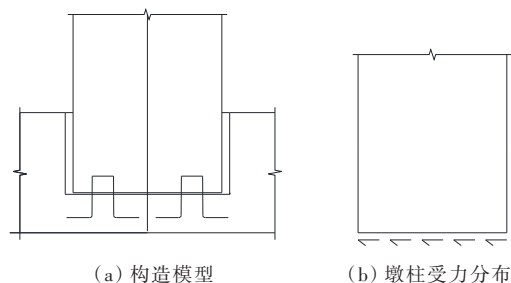


图3 从底部入手的改进承插式连接

作用相同,内填混凝土对于管壁内部也提供了挤压支撑,最终形成了双重挤压约束效应。所以在同样的承插深度时,具有双重挤压约束效应的空心墩的承插式构造约束效果比实心墩更好。

根据上述改进思路,最终提出如图4所示的离心管墩改进承插式设计方案。根据已有成果,取承台的承插深度与桥墩直径的比值为0.7。承台的承插深度与底板厚度比为2:1。承台高度为1.5 m,承插深度为1 m,底板厚度为0.5 m。管墩插入端采用锯齿构造,承台凹槽采用大直径波纹管成孔,且能对填缝混凝土形成约束效果。承台凹槽底部设置U形钢筋,增强竖向荷载下的抗冲切能力。为了满足纵筋锚固长度要求,墩底设置钢板与桥墩纵筋穿孔塞焊。下面通过公式推导计算承台的承插深度与桥墩直径比值的合理取值。

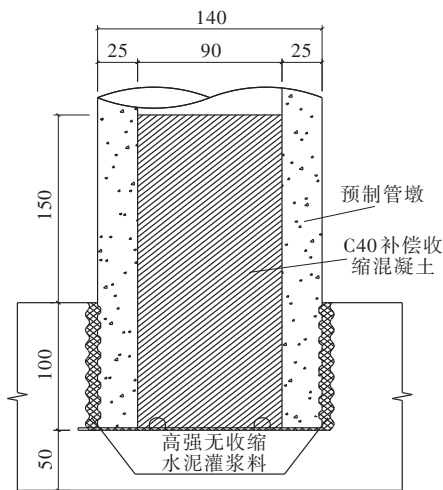


图4 改进承插式混凝土墩柱构造(单位:cm)

## 2 现有公式分析

目前针对承插式连接的研究,不少学者提出了承插深度计算公式。

### 2.1 美国 Mohebbi 和 Saiidi 设计公式<sup>[8]</sup>

Mohebbi 和 Saiidi 认为,立柱嵌入长度应满足其在立柱顶端具有能使所有力矩发挥出来的能力。利用刚性塑性应力理论可以简化应力分布。并得到下列公式:

$$H = \frac{1.56 V_{sd} + \sqrt{4.47 V_{sd}^2 + 6.22 M_{sd} \cdot f_c \cdot b_{eff}}}{f_c \cdot b_{eff}} \quad (1)$$

式中: $H$ 为嵌入长度; $V_{sd}$ 为作用在柱底的最大剪力;

$f_c$ 为混凝土轴心抗压强度; $b_{eff}$ 为有效柱宽,当为圆柱柱时, $b_{eff} = \sqrt{\pi} D/2$  ( $D$ 为圆柱直径); $M_{sd}$ 为作用于柱底的最大力矩。

### 2.2 加拿大 Sadeghian 设计公式<sup>[9]</sup>

对于不使用销钉或任何抗剪增强措施时,承插式连接钢筋混凝土基础中的FRP管约束混凝土的插入承台中的临界嵌入长度公式为:

$$\frac{X}{D} = 5.55 \times \frac{\tau_{max}}{f_c} \left( \sqrt{1 + 0.31 \times \frac{f_c}{\tau_{max}^2} \cdot \frac{M}{D^3}} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: $X$ 为埋入深度; $\tau_{max}$ 为最大黏结应力; $M$ 为破坏弯矩。

### 2.3 铁路工程预制规范<sup>[12]</sup>

对于早期铁路装配式小桥涵,当矩形柱与基础间选用杯形接头时:

$$h = \text{Max} \left\{ \sqrt{\frac{6M_b}{[\sigma_w]b}}; \sqrt{\frac{6M_a}{[\sigma_w]a}} \right\}, \text{且 } h_1 \geq 1.4a \quad (3)$$

式中: $h$ 为柱坑的深度(m); $a$ 为矩形柱截面长边长度(m); $b$ 为矩形柱截面短边长度(m); $M_a$ 为对平行于长边的中性轴的基顶弯矩(MN·m); $M_b$ 为对平行于短边的中性轴的基顶弯矩(MN·m); $[\sigma_w]$ 为混凝土弯曲受压及偏心受压的容许应力(MPa)。

采用圆柱形柱头时:

$$h_1 = \sqrt{\frac{7.6M_0}{[\sigma_w]d}}, \text{且 } h_1 \geq 1.4d \quad (4)$$

式中: $M_0$ 为顺桥向与横桥向基顶弯矩中的较大值(MN·m); $d$ 为圆柱直径(m)。

### 2.4 中国公路规范<sup>[13]</sup>

预制柱与杯口基础连接时,柱的插入深度 $H_1$ 要符合表1的要求,此外还应满足锚固长度的要求,一般为受力钢筋直径的20倍,并应考虑吊装时柱的稳定性,即 $H_1 \geq 1/20$ 柱长(指吊装时柱长)。表中 $h$ 为柱截面长边尺寸; $D$ 为管柱外径。柱轴心受压或偏心受压时, $H_1$ 可以适当减少;偏心距 $e_0 > 2h$ (或 $e_0 > 2D$ )时, $H_1$ 应适当加大。

表1 矩形或工字形柱的插入深度 $H_1$  cm

$h$	$H_1$	$h$	$H_1$
$< 50$	$(1.0 \sim 1.2)h$	$[80, 100]$	$0.9h \geq 80$
$[50, 80)$	$h$	$> 100$	$0.8h \geq 100$

### 2.5 FIB international Bulletin 43<sup>[14]</sup>

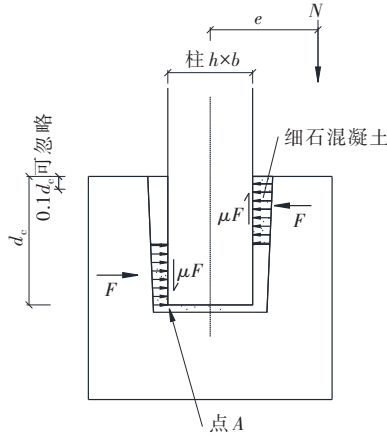
如图5所示,根据“Fib Bulletin 43(2008)”,应按

照下面公式中的规定,计算杯口基础的承插深度 $d_c$ :

$$\text{当 } \frac{M}{N} < 0.15h, d_c > 1.2h \quad (5)$$

$$\text{当 } \frac{M}{N} > 2.00h, d_c > 2.0h \quad (6)$$

式中: $h$ 为截面高度; $M$ 和 $N$ 分别为倾覆力矩和竖向荷载。对于中间值可以线性插值,对于接触面是粗糙化的情况可以进行折减。



注:图中 $\mu$ 为摩擦系数; $F$ 为挤压力。

图5 承插连接示意图

### 3 改进承插式连接设计公式推导

#### 3.1 设计公式的推导

承插深度是承插式连接中桥墩塑性铰能否充分形成的关键因素。为了保证最终破坏部位是桥墩底部形成塑性铰破坏,需要避免接缝区域的承台侧壁和灌浆料不能发生混凝土的压碎。依据此原理,根据弯矩平衡建立了设计计算公式。上述承插式桥墩的设计计算公式是针对传统光滑接触面的承插式连接的设计公式。下面在上述公式的基础上,考虑侧壁剪力键的构造,推导本文提出的改进承插式桥墩的承插深度计算公式。关于接缝剪力键抗剪强度公式,参考了美国AASHTO规范针对预制拼装主梁干接缝截面抗剪公式。图2(b)为剪力键的受力情况。由于剪力键截面分布不均匀,剪力键面积的取值通过等效角度分析来选取,按式(7)取用。若预制墩柱不设剪力键,则 $V_s$ (剪力键提供的剪力)可取零。

$$V_s = n \cdot A'_s \cdot 0.42f_c^{2/3} = \frac{X}{2h_m} \cdot \theta \cdot D \cdot h_m \cdot 0.42f_c^{2/3} = 0.21\theta DXf_c^{2/3} \quad (7)$$

式中: $n$ 为剪力键个数; $A'_s$ 为剪力键截面面积; $D$ 为试

件墩柱直径; $\theta$ 为剪力键面积角度取值,本文利用面积相等的原理建议 $\theta$ 取 $\pi/4$ ; $h_m$ 为剪力键的高度。

假设构件的抗弯承载力主要由3部分组成:侧壁挤压、侧壁摩擦力和侧壁剪力键。桥墩插入部分的模型受力分析见图6。

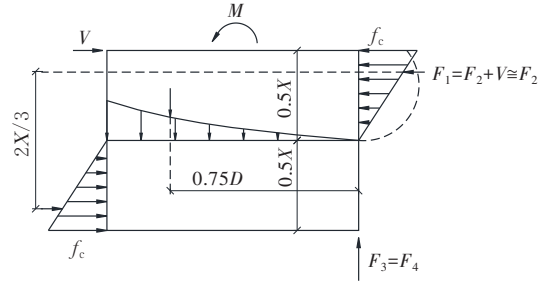


图6 模型受力分析图

根据弯矩平衡,列出平衡方程:

$$M = F_1 \cdot \frac{2}{3}X + F_4 \cdot 0.75D + V_s \cdot 0.75D \quad (8)$$

$$\text{式中: } F_1 = \frac{DXf_c}{2\pi}; F_4 = \frac{\pi DX\tau_{\max}}{2}.$$

最终得:

$$\frac{X}{D} = \left( \frac{5.55\tau_{\max} + 0.74 \cdot \theta \cdot f_c^{2/3}}{f_c} \right) \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{f_c \cdot M}{(1.8\tau_{\max} + 0.24 \cdot \theta \cdot f_c^{2/3})^2 \cdot D^3}} - 1 \right] \quad (9)$$

上述公式中,因为剪力键的存在,侧壁摩擦力的贡献作用可能不是主要因素。为了增加安全系数,也可以忽略侧壁摩擦力的贡献,此时只考虑侧壁挤压及剪力键的贡献,公式可简化为:

$$M = F_1 \cdot \frac{2}{3}X + V_s \cdot 0.75D \quad (10)$$

最终得:

$$\frac{X}{D} = \frac{0.74 \cdot \theta}{f_c^{1/3}} \left[ \sqrt{1 + \frac{17.12 \cdot M}{D^3 \cdot \theta^2 \cdot f_c^{1/3}}} - 1 \right] \quad (11)$$

式中: $M$ 为墩柱截面极限弯矩; $\tau_{\max}=0.71$  MPa。

#### 3.2 轴力影响分析

上述承插构造抗弯承载力推导过程中,没有考虑轴力的贡献。因为在水平荷载作用下,轴力相对墩底截面位置会随水平位移发生改变,所以不易在设计公式中体现。轴力的位置不同,造成压弯构件的偏心距不一样,最终轴力对抗弯承载力的影响也不同。桥墩在不同水平位移下绕转动原点 $O$ 的受力模型见图7。



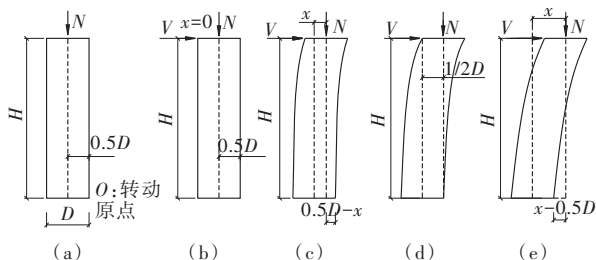


图 7 轴向作用

表 2 轴力影响效果汇总

$x$ 取值	受力模型图	轴力矩	外力合矩	轴力效果
$x=0$	图 7(b)	$M_N = N \cdot 0.5D$	$M = V \cdot H - N \cdot 0.5D$	最有利情况
$0 < x < 0.5D$	图 7(c)	$M_N = N \cdot (0.5D - x)$	$M = V \cdot H - N \cdot (0.5D - x)$	部分有利
$x=0.5D$	图 7(d)	$M_N = N \cdot 0 = 0$	$M = V \cdot H$	无影响,临界状态
$x > 0.5D$	图 7(e)	$M_N = N \cdot (x - 0.5D)$	$M = V \cdot H + N \cdot (x - 0.5D)$	不利情况

总的来说,小偏心距的轴力对于承插深度的需要是产生有利影响的,轴力能够减小外力矩,减小对构件的破坏作用,也能够减小埋置深度。因此可以认为本文的设计公式在非抗震区的正常使用工况下,不考虑轴力是偏于安全可靠的。

#### 4 结果分析

试验模型采用 C70 混凝土,设计值  $f_c = 31.5$  MPa,标准值  $f_c = 44.5$  MPa;  $D=0.7$  m;  $H=2.5$  m。当  $P=1\ 930$  kN,  $V=550$  kN 时,构件达到极限荷载强度,此时极限弯矩为  $M=1\ 375$  kN·m。将数据代入前文所述公式进行计算。所有计算结果汇总于表 3。

表 3 计算结果汇总

计算公式	嵌固深度		
	设计值 $f_c = 31.5$ MPa	标准值 $f_c = 44.5$ MPa	实际值 $f_c = 70$ MPa
Mohebbi 和 Saidi <sup>[8]</sup>	$0.95D=0.67$ m	$0.8D=0.56$ m	$0.63D=0.44$ m
Sadeghia 公式 <sup>[9]</sup>	$0.93D=0.65$ m	$0.8D=0.56$ m	$0.65D=0.45$ m
铁路规范 <sup>[12]</sup>	$0.95D=0.67$ m	$0.95D=0.67$ m	$0.95D=0.67$ m
中国公路规范 <sup>[13]</sup>	$1.5D=1.05$ m	$1.5D=1.05$ m	$1.5D=1.05$ m
FIB international <sup>[14]</sup>	$1.5D=1.05$ m	$1.5D=1.05$ m	$1.5D=1.05$ m
提出的设计公式	$0.83D=0.57$ m	$0.7D=0.49$ m	$0.56D=0.39$ m
提出的简化设计公式	$0.92D=0.64$ m	$0.77D=0.54$ m	$0.60D=0.42$ m

由表 3 可知:承插式管墩极限嵌固深度  $X$  在  $0.63D \sim 1.5D$  之间。其中本文提出的设计公式结果与

图 7 中:  $N$  为轴向力;  $H$  为试件高度;  $D$  为试件直径;  $O$  为试件在试验过程中发生变形的转动原点;  $x$  为轴力的水平位移大小。根据轴力的等效偏心距不同,可分为几种情况,汇总于表 2 中。

实际工程应用中,极端荷载作用下可能出现最后一种情况,此时轴力的水平位移过大,构件可能已经遭到了很严重的破坏无法继续工作或者倒塌。

试验结果吻合,与现有公式相比,  $X$  值最小,分别为  $0.57$  m 和  $0.64$  m,设计公式基本正确。根据本文提出的设计公式和尺寸取整的考虑,极限承插深度最小为  $0.7D$ 。

针对本文提出的设计公式对公式中各个部分所占比例进行分析,即式(9)。对  $F_1$ 、 $F_4$ 、 $V_s$  的占比进行计算,最终得到一个只与混凝土强度有关的值,故在相同混凝土强度等级下  $F_1$ 、 $F_4$ 、 $V_s$  在总体中的占比分别为:  $69\%$ 、 $11\%$ 、 $20\%$ 。可知剪力键贡献的内力在总体中占有相当一部分比例,因此不能将该部分内力忽略不计。

对于影响承插深度的因素,除了连接部分的构造、轴力外,还有一个重要因素为管壁挤压混凝土的强度等级。为研究桥墩混凝土强度等级对埋置深度的影响,取不同混凝土强度等级,按照本文提出的设计公式,计算其埋置深度,最终结果如图 8 所示。

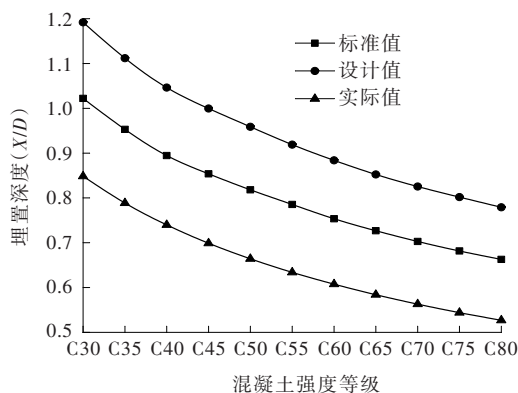


图 8 不同混凝土强度等级与埋置深度关系曲线

由图 8 可知:在不同的混凝土强度等级下,构件的埋置深度不同。随着混凝土强度等级的增加,埋

置深度需求逐渐减小,埋置深度减小的幅度也逐渐减小,当混凝土强度等级为C70时,强度标准值和设计值分别对应 $0.7D$ 和 $0.83D$ 。因此,同等条件下,为减小埋置深度可以提高混凝土的强度等级,但混凝土强度较低时,埋置深度减小幅度大;当混凝土强度较大时,埋置深度减小幅度小。

## 5 结论

传统承插式连接构造存在抗拔能力弱,竖向承载力削弱,抗弯所需的承插深度深等不足,限制了其在工程实践中的应用。针对上述缺点,采取增加侧壁剪力键、提高填缝材料强度和约束水平,墩底设置穿孔塞焊钢板和抗冲切钢筋等措施,提出改进承插式的构造方案。基于现有学者提出的公式,进行改进承插式抗弯能力计算公式及其影响因素分析。通过理论推导结合试验结果分析,得出以下结论:

(1) 传统承插式设计计算公式,混凝土和填缝料的强度不高。承插深度一般要求为 $1.2D\sim 1.5D$ 。在采用高强混凝土和填缝料后,可使承插深度减少。在桥墩混凝土强度等级为C70时,取设计值、标准值和实际值时,管墩的极限嵌固深度 $X$ 为 $0.7D\sim 1.0D$ 。

(2) 嵌缝附近的混凝土有管墩混凝土、高强填缝料、金属波纹管等。高强填缝料的强度高于管墩混凝土强度,建议计算时选取强度相对较低的管墩混凝土的强度标准值进行计算,极限状态下取管墩设计值太保守。本文中考虑剪力键可以有效地提高连接处的抗弯承载能力,减小埋置深度。在桥墩混凝土强度等级为C70、连接部位设置有剪力键的情况下,根据本文提出的设计公式,当混凝土强度取标准值时,计算管墩极限嵌固深度最小为 $0.7D$ 。

(3) 针对本文试验构件,在埋置深度为 $0.7D$ 的情况下,在受力模型中,剪力键的贡献作用在所有内力中占比20%,对埋置深度的大小具有较大的影响,不能忽略其作用。

(4) 轴力偏心对于埋置深度的影响可以分为以下几个方面:当轴力的偏心距 $e=0$ 时,结构受力为最有利情况;当 $0<e<D/2$ 时,为有利情况,可作为结构受力安全储备;当 $e=D/2$ 时,为临界情况;当 $e>D/2$ 时,为不利情况,需要增大承插深度。

(5) 在同等条件下,提高混凝土的强度等级能够减小埋置深度,混凝土强度较低时,埋置深度减小幅

度大,当混凝土强度较大时,埋置深度减小幅度小。

## 参考文献:

- [1] 王景全,王震,高玉峰,等.预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J].工程力学,2019,36(3):1-23.
- [2] KHALEGHI B, SCHULTZ E, SEGUIRANT S, et al. Accelerated bridge construction in Washington State: From research to practice[J]. PCI Journal, 2012, 57(4): 34-49.
- [3] 姜海西,卫张震.承插式预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J].城市道桥与防洪,2017(12):56-59,10.
- [4] 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.
- [5] OSANAI Y, WATANABE F, OKAMOTO S. Stress transfer mechanism of socket base connections with precast concrete columns[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1996, 93(3): 266-276.
- [6] MASHAL M, PALERMO A. Quasi-static cyclic testing of half-scale fully precast bridge substructure system in high seismicity[C]//NZSEE Conference, 2014: 1-9.
- [7] 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.
- [8] MOHEBBI A, SAIIDI M, ITANI A. Development and seismic evaluation of pier systems w/pocket connections, CFRP tendons and ECC/UHPC columns M Rep. No. CCEER-17-02 [R]. Reno: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, 2017.
- [9] SADEGHIAN P, FAM A. Bond-slip analytical formulation toward optimal embedment of concrete-filled circular FRP tubes into concrete footings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(4): 524-533.
- [10] 杨先凡.承插式预制拼装桥墩接头的力学行为研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [11] 贾俊峰.预制装配桥墩关键技术研究及应用进展[J].建筑工业化,2020,3(2):27-39.
- [12] 铁道部第一勘测设计院.铁路装配式小桥涵技术规则: TBJ 107—1992[S].北京:铁道部建设司标准科情所,1992.
- [13] 廖朝华.公路桥涵设计手册:墩台与基础[M].2版.北京:人民交通出版社,2013.
- [14] ENGSTRÖM B, ALEXANDER S, CHOLEWICKI A, et al. Structural connections for precast concrete buildings[M]. Switzerland: The International Federation for Structural Concrete, 2008.
- [15] 岳文超.承插式离心管墩与承台连接力学特性研究[D].上海:上海应用技术大学,2020.