

钢护筒混凝土灌注桩的基础抗震性能研究进展

张菊辉, 姜大威

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要:深水桥梁基础施工时的钢护筒在钻孔灌注桩施工完毕后保留, 桩体实际上形成了上大下小的变截面混合桩。利用钢护筒参与桩身受力求改善基础的抗震性能, 具有高效、简便且又经济的突出特点, 有广泛的应用前景。本文针对目前钢护筒混凝土灌注桩的应用、研究现状、钢护筒混凝土桩和钢管混凝土桩的区别以及钢护筒混凝土灌注桩的基础抗震性能研究存在的问题等进行了总结与归纳, 并提出一些建议。为钢护筒混凝土灌注桩的进一步研究提供参考。

关键词: 钢护筒; 混合桩; 抗震; 承载特性

中图分类号: TU528.73

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0142-05

Progress in basic anti-seismic property of steel tube concrete drilled pile

ZHANG Juhui, JIANG Dawei

(College of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The steel casing was left after the construction of cast-in-place piles when constructing the deep-water bridge foundation. Then the pile actually formed a variable section pile which has a bigger section area at upper part and a less area at down part. To use the steel tube for force can improve the seismic performance of pile foundation, which has the advantages of high efficiency, simple and economical and has wide application prospect. According to the current situation of research and the application of steel tube concrete drilled pile, the difference between steel tube concrete pile and steel pipe concrete pile, the problem in the research of basic seismic performance of steel tube concrete pile, the paper pointed out some suggestion which can provide a reference for the further research of steel tube concrete pile.

Key words: steel tube; hybrid piles; anti-seismic; bearing characteristics

随着经济的发展,我国桥梁建设也进入了最辉煌的发展时期,而且大跨度桥梁深水基础绝大多数采用承台加群桩的基础结构,施工期间采用插打钢护筒形成施工平台,进而形成施工桩基础承台等施工工艺,很多桥梁结构在桩基础施工完成后保留钢护筒作为永久构件使钢护筒全部或者部分参与桩基础受力。基于此本文针对目前钢护筒混凝土灌注桩的应用现状,钢护筒和桩身共同承载的特性以及钢护筒和上部承台的连接方式等各个方面进行总结和概括,并提出一些合理的建议,为进一步的研究提供参考。

1 钢护筒混凝土灌注桩的应用

近十多年来,我国桥梁建设进入了最辉煌的发展时期,截至目前,我国大陆已建成千米以上大跨度桥梁7座,800 m以上大桥11座。值得注意的是,美国、欧洲以及日本等的大跨度桥梁较多采用沉箱基础,而我国绝大多数采用钻孔灌注桩群桩基础,其中在深水场地下又多为高桩承台结构形式,形成了我国大跨度桥梁基础类型独特而鲜明的特点,如表1所示^[1-3],这充分显示出钢护筒混凝土灌注桩在国内大跨度桥梁基础建设中应用的广泛性。

收稿日期:2014-04-08; 修回日期:2014-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51008222)

作者简介:张菊辉(1981-),女,上海杨浦人,工学博士,主要从事混凝土损伤和桥梁抗震方面的研究。

通讯作者:姜大威(1989-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为工程结构分析。

表 1 国内外典型大跨度桥梁基础类型

m

桥梁名称	国别	主跨	基础类型描述
苏通长江大桥	中国	1088	南北塔均为高桩承台,桩径 2.8/2.5 m 变截面
昂船洲大桥	中国香港	1018	低桩承台基础,桩径 2.8m
Rion - Antirion Bridge	希腊	3 × 560	减隔震基础
鄂东长江大桥	中国	926	南塔低桩承台,桩径 2.5m;北塔高桩承台,桩径 2.8/2.5m 变截面
Normandy Bridge	法国	856	低桩承台,桩径 2.1m
荆岳长江大桥	中国	816	南塔低桩承台,桩径 2.2m;北塔高桩承台,桩径 3.0m
东海大桥(颍珠山)	中国	420	南北塔均为高桩承台,桩径 2.5m
杭州湾大桥(北航道)	中国	448	南北塔均为高桩承台,桩径 3/2.5m 变截面
Akashi Kaikyo Bridge	日本	1991	沉箱基础
西堠门大桥	中国	1650	低桩承台,桩径 2.8m
Great belt Bridge	丹麦	1624	沉箱基础
润扬长江大桥	中国	1490	南塔低桩承台,桩径 2.8m;北塔高桩承台,桩径 2.8m
南京长江四桥	中国	1560	南北塔均为高桩承台,南塔桩径 3.2/2.8m 变截面,北塔桩径 2.8m
Tataro Bridge	日本	890	沉箱基础
江阴长江大桥	中国	1385	感潮河段,低桩基础,桩径 3m
青马大桥	中国香港	1377	沉箱基础
Gold Gate Bridge	美国	1280.2	沉箱基础
响礁门大桥	中国	951	高桩承台,桩径 2.5m
Verrazano Bridge	美国	1298.5	沉箱基础
Humber Bridge	英国	1410	北塔为混凝土闸式基础,南塔为沉箱基础

2 钢护筒混凝土灌注桩基础在地震中的特点

近年来,我国许多大跨度桥梁的结构抗震性能研究表明:高桩承台基础由于承台体量巨大,在地震作用下会产生很大的水平惯性力,并且承台与上部结构之间还会产生明显的高模态动力耦合效应,再加上深水区的桥梁基础自由段桩身又缺乏土体侧向支撑作用,致使基础部分往往成为结构在地震作用下的首要薄弱环节^[4-5]。以苏通大桥为例,钢箱梁重约 4.9 万 t,两个桥塔总重约 14.3 万 t、两个承台总重则高达 30 余万 t,约合桥塔与钢箱梁总重的 1.6 倍。抗震分析结果表明,桩基中 80% 的水平地震力由承台惯性力产生^[6]。尽管高桩承台基础较长的桩身自由段可以提高基础的柔度,并可能使整个承台底的水平地震力有所下降,但较长的桩身自由段同时也导致了较大的单桩桩身弯矩。一般情况下,高桩承台基础的单桩最大弯矩位于桩顶与承台的节点处或入土 1 ~ 3 倍桩径处^[7-8]。目前我国大跨度桥梁中的高桩承台基础,由于建成时间尚短而未经历真正的强震检验,但与之相类似的高桩码头在历次强震中,最常见的震害即为发生在桩顶处的节点破坏或入土 1 ~ 3 倍桩径处的桩身弯曲破

坏^[9-10]。

高桩承台基础的钻孔灌注桩一般都需要沉放钢护筒来辅助施工,但在施工完成后又难以拔出再利用。由于钢护筒的实际埋置区段与桩身地震响应较大的区段非常接近,因此,若能充分利用钢护筒的强度和延性来参与混凝土灌注桩的桩身受力,形成钢护筒 - 混凝土灌注桩组合基础,进而提升整个基础的抗震性能,将不失为一个经济、简便而又有效的解决方案。

3 国内外研究现状

3.1 国外的研究现状

目前,针对钢护筒 - 混凝土灌注桩抗震性能的相关研究还非常少,尤其是缺乏基础性试验研究的报道,对其共同承载机理以及结构抗震性能尚缺乏明确的研究结论。但从结构构成上看,钢护筒 - 混凝土灌注桩与钢管混凝土桩之间存在很大的相似性,因此,可以首先从钢管混凝土桩的相关研究成果中获得有益的启示。在美国,自 20 世纪 80 年代, Priestley 等学者开展了有关钢管混凝土桩的抗震性能试验研究,表明外套钢管可以显著提高混凝土桩的抗弯、抗剪以及约束延性等性能。近年来,出于对强地震区、软弱或液化场地中的桩基抗震设计与加

固需求,加州大学、密苏里大学、华盛顿大学、阿拉斯加交通部等相关高校和研究机构广泛开展了对 CISS (cast - in - steel - shell - pile) 的抗震性能研究。其中,比较具有代表性的研究包括:Seible 等人根据群桩基础在地震作用下的内力响应特点,进行了 CISS 桩在压弯、反向拉弯往复作用下的试验研究,指出 CISS 桩的破坏一般由拉弯状态控制^[11-12]; Gebman 等人研究了 CISS 桩的轴向荷载传递机理^[13]; Silva 等人在此基础上进行了 CISS 群桩基础的非线性推倒分析^[14]; Weaver 等人则研究了 CISS 桩用于抵抗不同土层之间的相对错动以及液化土的侧向流动等^[15]。在日本,1992 年 Nippon Steel 针对宫城县地震后混凝土桩的震害问题,开发了 SKTB 钢管混凝土灌注桩(又称耐震桩)^[16]。该灌注桩的突出特点是混凝土桩基的外套钢管由带肋钢板卷焊而成,因此极大地改善了混凝土与管壁之间的粘结咬合作用,可以有效地防止两者之间的滑移。该 SKTB 桩在 1995 年神户地震中极少发生破坏,表现出了非常优越的抗震性能,目前 SKTB 桩在日本已申请了多项技术专利^[17]。由于欧美以及日本等国的大跨度桥梁较多采用沉箱基础,而钢护筒混凝土灌注桩的应用相对较少,所以直接针对钢护筒混凝土灌注桩的承载机理的研究报道还很少。

3.2 国内的研究现状

国内部分学者也对钢管混凝土结构,用于强震地区的基础工程进行了相关研究^[18-19]。钢护筒桩在国内利用较多,而直接针对钢护筒混凝土灌注桩的承载特性的研究表明:对于单桩而言钢护筒可以提高其承载特性,其传力机理有别于一般超长桩,上部荷载由基础和钢护筒共同承担,对于群桩而言,钢护筒使荷载分布更均匀^[20]。

(1) 钢护筒效应对竖直方向承载力的影响。研究表明大直径钻孔灌注桩竖直方向极限承载力若考虑钢护筒变截面效应则可以提高 10% 左右。不考虑钢护筒的效应验算桩身强度是偏于保守的,应该对有钢护筒的桩段进行强度验算。在相同条件下,考虑钢护筒效应比不考虑钢护筒效应,桩的沉降量减小约 27%,随着钢护筒埋置深度的增加,桩的沉降量略有减小,筒壁的粗糙程度对沉降量影响很大,钢护筒内存在一定厚度的泥皮或钢护筒内壁有凸起,对沉降量影响很小,可以忽略不计。

(2) 钢护筒效应对水平方向承载力的影响。研究表明,实验加入泥皮的构件比没有泥皮的构件水平方向的承载能力下降 27.5%,施工中控制泥皮的

厚度有助于提高承载力。在加载初期,泥皮的厚度对构件水平位移的变化并不明显,随着荷载的增加,泥皮对构件的水平位移的影响越来越明显。不可回收的钢护筒与钻孔灌注桩形成了组合桩,基于 NL 法的计算显示钢护筒效应可以减少桩顶水平位移 50%。在水平反复荷载作用下,钢护筒与内部的钢筋混凝土的应变值在针对水平荷载响应上存在差异^[21]。

4 钢护筒混凝土灌注桩和钢管混凝土灌注桩的区别

研究显示,钢管混凝土桩的良好抗震性能也反映出采用钢护筒参与桩身受力求提高高桩承台基础的抗震性能是合理可行的。事实上,这一方法已经在我国许多大跨度桥梁(如苏通大桥、马鞍山长江大桥、广州凤凰一桥、惊驾桥、上海长江大桥、椒江二桥等)上得到不同程度的应用。但参与大桥工程抗震研究工作的工程师们切实地体会到:由于目前针对钢护筒参与桩身受力的相关作用机理尚缺乏明确的认识,造成设计或研究人员在具体应用这一方法时存在较大的分歧和不确定性,有的设计人员甚至直接引用了钢管混凝土桩的研究结论。事实上,钢护筒 - 混凝土灌注桩与钢管混凝土桩在结构构造特点、成桩条件以及地震易损部位等方面均有明显的不同,主要体现为以下几点:

(1) 在结构构造上,深水场地中的钻孔灌注桩桩径一般都比较大,其常用桩径为 2.2 ~ 3.0 m,而美国 CISS 桩的常用直径为 0.3 ~ 0.6 m,日本的 SKTB 桩则为 0.6 ~ 1.2 m。此外,在钢管的制作工艺与规格上也存在较大的差异,钢护筒一般是由普通钢板卷焊而成,常用厚径比 t/D 为 1/300 ~ 1/150, CISS 桩一般选用符合 ASTM 标准的无缝钢管,常用厚径比 t/D 为 1/30 ~ 1/120, SKTB 桩则是采用带肋钢板螺旋卷焊而成的钢管,常用厚径比 t/D 为 1/50 ~ 1/100。

(2) 钢护筒 - 混凝土灌注桩的界面粘结状况更为不利。由于水下灌注混凝土、饱和泥浆护壁等成桩过程中的诸多不利因素,决定了钢护筒与混凝土灌注桩桩身界面之间的粘结状况与钢管混凝土桩是不相同的。日本的 SKTB 桩采用带肋钢板用以加强两者之间的粘结性能,也从侧面佐证了这一点。因此,按照钢管混凝土桩的界面粘结假设来分析钢护筒 - 混凝土灌注桩,将可能导致结果偏于不安全。目前,国内工程界对于这一问题存在着两种不同的

处理方式:一种是假设界面刚性粘结、无滑移,即按普通钢管混凝土组合截面进行分析;另一种则按并列构件进行分析,即认为钢护筒与混凝土灌注桩之间完全无粘结,两者按各自的弹性刚度来分担荷载。但有研究表明:按照这两种方式对同一构件进行分析,其结果相差可达3倍以上^[22]。此外,同济大学还在理论分析的基础上,提出了考虑混凝土开裂桩身刚度发生折减的修正并列构件分析模型,并已应用于椒江二桥的基础抗震设计。但目前这些分析模型和方法均未体现钢护筒-混凝土灌注桩界面的实际粘结状况,并且,对于可能发生的界面粘结滑移、以及由此导致的截面刚度变化、阻尼特征的改变等均未见相关的研究报道。由此可见,由于钢护筒-混凝土灌注桩界面粘结状况的复杂性,目前对两者的共同作用机理尚不清楚,造成了在相关计算模型和分析方法上的不统一。

(3)两者的结构地震易损部位与研究侧重点也不相同。高桩承台基础的单桩最大弯矩通常发生在桩顶承台节点处,是地震作用下的首要薄弱部位。但对于低桩承台基础,国内外大量研究(Sadek^[23], Weaver^[15], Cubrinovski^[24]等)已表明,不同土层间错动或液化土侧向流动所引起的桩身弯矩要远大于桩顶承台节点处的弯矩,因此 Ashford 等人将 CISS 桩用于抵抗土层错动或场地土液化流动时,其主要关注的对象是桩身而不是节点。现有的 CISS 桩与承台的节点连接较多采用了无嵌入或浅嵌入的形式,显然,这并不会提高节点的承载能力,因此并不适合钢护筒-混凝土灌注桩;SKTB 桩一般是将带肋钢管嵌入承台以加强节点的强度和延性,但钢护筒由于直径较大,采用这种方式则可能导致较大区域内的承台底层钢筋无法连续。目前,国内对于钢护筒与承台的节点连接构造也存在较大的差别,有的在护筒外焊接锚固钢筋,有的则采用了类似 CISS 桩的浅嵌入形式。锚固钢筋虽然可以提高节点区域的承载能力,但由于其截面强度总和通常仅为钢护筒截面强度的 20%~60%,这些节点构造形式本质上仍属于“弱节点”连接,因此节点的合理构造措施和抗震性能将制约整个基础的抗震性能,需要进行更为深入细致的研究分析^[25]。

5 钢护筒混凝土灌注桩研究中存在的问题及建议

5.1 存在的问题

首先由于对钢护筒混凝土灌注桩的研究比较

少,对于钢护筒参与桩身受力的共同承载特性还缺乏足够充分的认识。针对钢护筒和承台的连接节点构造形式还没有统一的结论。设计人员和研究人员存在较大的分歧和不确定性。其次,针对钢护筒和桩共同承载的室内试验设计不够完善,实验构件和实际工程情况区别很大,需要定量研究泥皮厚度对混凝土灌注桩的承载特性的影响,没有一套明确的计算方法计算有泥皮的钢护筒的变截面桩的极限承载力。数值模拟中很多计算参数在地质勘察中很难准确得到。桩和承台的链接方式受施工条件的限制目前采用的链接方式多是弱接点,没能给出便于实际施工的、有效的连接构造方式。关于径厚比、长细比、混凝土强度、钢护筒强度、钢筋的配筋率等等各方面的对钢护筒混凝土灌注桩的承载特性的影响更是缺乏研究。

5.2 建议

(1)针对钢护筒与混凝土灌注桩的界面粘结状况,研究两者的共同承载特性。结合群桩基础在抗震作用下的受力特点,开展拉压交替轴力和往复水平荷载联合作用下的钢护筒混凝土灌注桩轴身拟静力实验研究,并基于此建立钢护筒与混凝土灌注桩桩身共同承载有限元分析模型,给出钢护筒和混凝土合理的接触假定。

(2)针对桩顶与承台合理节点的构造方式的研究,结合目前实际工程中采用的方法,针对几种典型的钢护筒和混凝土的结构连接形式与构造参数,进行拉压交替轴力和往复水平荷载联合作用下的拟静力实验,重点研究节点区域的承载能力、变形能力。基于此结合数值分析,建立有限元模型,进行对比研究分析。

(3)针对上述的研究一定要结合实际工程进行验证分析,结合实际工程检验实验及模拟得到的假定,深入全面地评估混凝土灌注桩的抗震性能。并在此基础上结合成熟的钢管混凝土桩理论提出钢护筒混凝土灌注桩的承载力的计算方法。为我国设计和研究人员提供准确而统一的理论基础。

6 结 语

综合以上所述,利用钢护筒参与桩身共同受力将是提高高桩承台基础抗震性能的一项合理、有效且又非常经济的抗震设计方法与措施,符合我国大跨度桥梁基础的现状和特点,具有广泛的应用前景。但由于目前尚缺乏具有针对性的相关研究,对其共同承载机理以及钢护筒和承台的连接方式尚缺乏明

确的认识,造成了在分析方法以及构造措施处理上的不统一。为此,开展钢护筒参与桩身受力的抗震机理研究与组合基础抗震性能评估意义重大,相关研究成果将为我国的大跨度桥梁防震减灾提供直接的理论与技术支持。

参考文献:

- [1] Jacaues Combault. The Rion-antirion bridge-when a dream becomes reality[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2012,5(4):34-38.
- [2] 周彦,何锋. 香港地区钻孔灌注桩的主要施工方法[J]. *世界桥梁*,2013,41(4):30-34.
- [3] 金增洪. 日本多多罗大桥简介[J]. *国外公路*, 1999,19(4):8-13.
- [4] 叶爱君,张喜刚,刘伟岸. 河床冲刷深度变化对大型桩基桥梁地震反应的影响[J]. *土木工程学报*, 2007,40(3):58-62.
- [5] 叶爱君,刘伟岸,王斌斌. 高桩承台基础与桥梁结构的动力相互作用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007,35(9):1163-1168.
- [6] 胡世德,叶爱君. 苏通长江公路大桥结构抗震性能研究[J]. *同济大学土木防灾国家重点实验室:上海*,2002.
- [7] 易笃韬,邵旭东,李立峰,等. 软土地基上桥台桩基受力算法研究[J]. *中国公路学报*, 2007,20(5):59-64.
- [8] Tahghighi H, Konagai K. Numerical analysis of nonlinear soil - Pile Group Interaction under Lateral Loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007,27(5):463-474.
- [9] 贾学敏. 海岸高桩码头结构受地震和海浪荷载作用的近似计算[J]. *振动、测试与诊断*, 1993,13(1):17-23.
- [10] 李悦,宋波. 高桩码头震害分析及减震措施[J]. *水道港口*,2006,27(2):101-104.
- [11] Silva P F, Seible F. Seismic performance evaluation of cast-in-steel-shell (CISS) piles[J]. *ACI Structural Journal*, 2001,98(1):36-49.
- [12] Silva P F, Seible F. Experimental procedure for testing of piles under varying axial and lateral loads[J]. *Experimental Techniques*, 2001,25(1):25-29.
- [13] Gebman Michael J, Ashford Scott A, Restrepo Jose I. Axial force transfer mechanisms within cast-in-steel-shell piles[R]. University of California: San Diego,2006.
- [14] Silva P F, Manzari M T. Nonlinear pushover analysis of bridge columns supported on full - moment connection CISS piles on clays[J]. *Earthquake Spectra*, 2008,24(3):751-774.
- [15] Weaver Thomas J, Ashford Scott A, Rollins Kyle M. Response of 0.6 m cast in steel shell pile in liquefied soil under lateral loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005,131(1):94-102.
- [16] Hagiwara Kenji, Kawabata Noriyuki, Yamaguchi Tanemi, et al. Performance and design of concrete-steel composite pipe 'NS rib pipe' [R]. Nippon Steel Corp,1992.
- [17] Hisatoshi Shimaoka, Kazumi Sawamura, Takashi Okamoto. New construction materials for social Infrastructures [J]. *NKK Technical Review*, 2003(88):89-99.
- [18] 黄明奎,汪稔,李斌,等. 钢管混凝土结构在桩基工程中的应用探讨[J]. *岩土力学*, 2003,24(z1):550-554.
- [19] 尚作庆,黄承逵,常旭,等. 钢管自应力混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2008,28(3):77-81.
- [20] 唐勇. 钢护筒对超长钻孔灌注桩承载性能的影响[J]. *工程勘察*,2012,40(7):28-31.
- [21] 穆保岗,班笑,龚维明. 考虑钢护筒效应的混合桩水平承载性能分析[J]. *土木建筑与环境工程*,2011,33(3):68-73+118.
- [22] 黄亮生,冯向宇. 钢护筒参与桩身受力的构造处理和计算分析[J]. *结构工程师*, 2005,21(4):52-55.
- [23] Sadek M, Shahrou I. Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropile[J]. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 2006,26(5):461-468.
- [24] Cubrinovski M, Kokusho T, Ishihara K. Interpretation from large - scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006,26(2):275-286.
- [25] 赵岩,林家浩,唐光武. 复杂结构局部非线性地震反应精细时程分析[J]. *大连理工大学学报*, 2004,44(2):190-194.