DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.05.031

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来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. Accorsing 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

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(颗珠山)	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	北塔为混凝土阀式基础,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

m

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来提高高桩承台基础 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 SK-TB 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查中很难 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,开展钢护简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:

- Jacaues Combault. The Rion-antirion bridge-when a dream becomes reality[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in Chna, 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 S cottA, Rollins Kyle M. Response of 0. 6 m cast in steel shell pile in liquefied soil under lateral loading [J]. Journal of Geothchnical 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 socialInfrastructures
 [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, Shahrour 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.