

屈曲约束支撑在电厂主厂房中的应用分析

漆 桢

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川成都 610061)

摘 要:根据市场需求,在高烈度地区建设的大型发电厂项目数量呈增加趋势,电厂主厂房结构抗震性能及经济性是设计人员关注的重点问题之一。本文将探讨将屈曲约束支撑应用到高烈度地区电厂钢结构主厂房的可行性。通过对设置屈曲约束支撑的钢结构主厂房弹性阶段及弹塑性阶段分析结果,探讨屈曲约束支撑合理的布置方式、结构抗震性能提升情况、经济价值。

关键词:电厂;主厂房;屈曲约束支撑;四川电力设计咨询有限责任公司

中图分类号: TJ303

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)S2-103-05

中国是世界上地震活动强烈和地震灾害严重的国家之一,近年来地震灾害给我国造成了巨大的人员伤亡和经济损失。国家修订建筑抗震设计规范,提高了部分抗震设防标准,对建筑抗震提出了新的要求。高烈度地区电厂主厂房的抗震能力及经济性一直以来都是电力行业结构工程师关注的焦点问题之一。近年来笔者接触到的电厂设计项目地震设防烈度越来越高,达到了 8 度(0.2g)甚至 9 度(0.4g),仅靠常规的解决方案,难以完全解决工程实际问题。各大电力设计院通过总结近年来地震震害经验教训,对提高结构抗震能力做了较多研究和探索,取得了较多成果。作为高烈度地区结构抗震解决方案之一, BRB 支撑(屈曲约束支撑)在电厂主厂房中应用研究还处于起步阶段。笔者将对钢结构主厂房使用 BRB 支撑后结构抗震性能变化特点进行探讨,总结通用合理的布置方案,对其经济性进行客观评价。

1 屈曲约束支撑在电厂主厂房中的应用研究

1.1 研究目标

研究 BRB 支撑对结构整体抗震性能的影响。

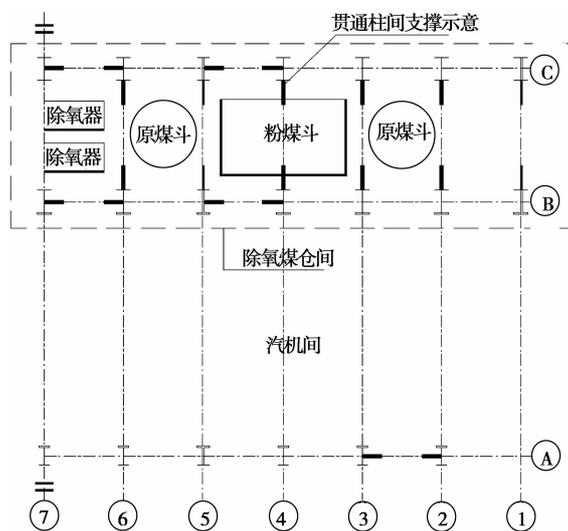
研究 BRB 支撑对结构动力性能的影响,如何合理布置,以减小结构地震作用。

研究 BRB 支撑经济效益。

1.2 结构布置

以某发电项目钢结构主厂房为案例,研究支撑

一单框排架钢结构主厂房 BRB 支撑应用。案例项目设防烈度 8 度(0.27g, 安评),地震分组为第三组,场地类别为 III 类。本厂房除氧煤仓间纵向长 88 m,柱距 8 m,共 12 个轴线,横向宽度 13.5 m,高 36.5 m(不含转运站高度);厂房汽机间长 80 m,跨度 33.2 m,高 28 m。主厂房平面布置如图 1 所示。



注:2~12 轴线框架布置大致关于 7 轴线对称

图 1 主厂房平面布置示意

笔者将对比钢结构主厂房设置普通支撑及 BRB 支撑结构性能差异,为方便研究,在概念分析阶段,两种模型采用同样的支撑布置形式,仅对 BRB 支撑出现交叉撑时,将其改为米字撑。结构布

置示意图 2 和图 3。

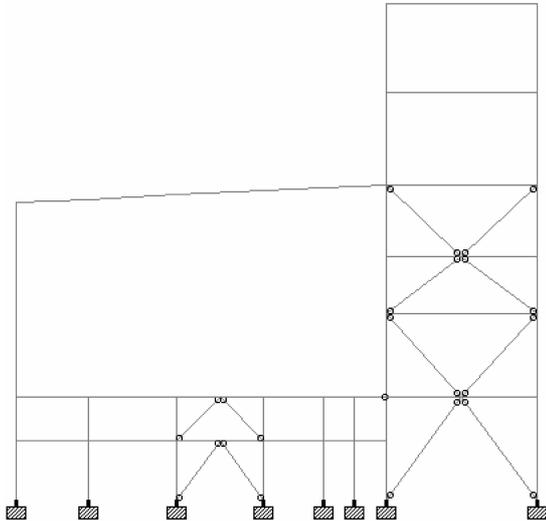


图 2 主厂房横向示意

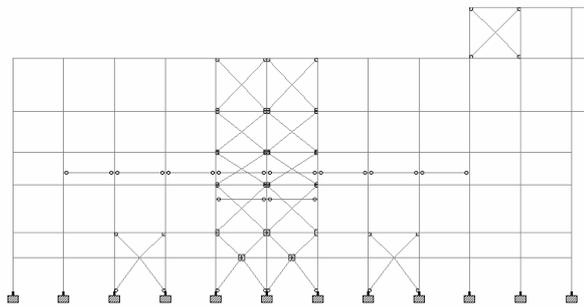


图 3 主厂房纵向示意

1.3 计算及布置原则

结构弹性阶段采用 Midas Gen V780 结合 STAAD Pro 软件分析,结构弹塑性阶段采用 Midas Gen V780 静力非线性分析模块 PushOver 分析。BRB 支撑采用等刚度模拟。研究在普通支撑框架模型基础上,从结构 0 m 至除氧煤仓间屋面,各层分别采用 BRB 支撑替代普通钢支撑建立多个模型,对比计算数据得出结论。下文中未特别说明时,计算模型编号 1 代表所有支撑均为普通支撑,2 代表模型 0~9 m 普通支撑替换为 BRB 支撑,3 代表 0~16.5 m 普通支撑替换为 BRB 支撑,4 代表 0~22 m 普通支撑替换为 BRB 支撑,5 代表 0~36.5 m 普通支撑替换为 BRB 支撑,6 代表 22~36.5 m 普通支撑替换为 BRB 支撑。

1.4 减震分析

对比各个模型计算结果表明使用 BRB 支撑后,结构主振型周期均呈增大趋势,结构底部 CQC 地震总剪力呈先增加后降低趋势,表 2 统计表明:结构横向当

表 1 各模型周期对比表 s

| 模型编号 | 振型号 | | |
|------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Y0.921 | X0.758 | X0.717 |
| | (63.2) | (20.2) | (39.9) |
| 2 | Y0.956 | X0.775 | X0.743 |
| | (66.2) | (31.5) | (33.7) |
| 3 | Y0.976 | X0.803 | 0.779 |
| | (66.3) | (40.8) | (26.8) |
| 4 | Y0.979 | X0.818 | X0.797 |
| | (65.8) | (47.0) | (20.4) |
| 5 | Y1.010 | X0.847 | X0.825 |
| | (63.6) | (42.6) | (23.0) |
| 6 | Y0.954 | X0.790 | X0.748 |
| | (60.8) | (18.0) | (40.5) |

注:表中 X、Y 表示振型方向,括弧内数字为参振质量百分比。2 振型与 3 振型振动方向一致,其中 2 振型位移大于 3 振型。第 3 振型以后周期基本小于 0.65 s。

表 2 各模型底部 CQC 总剪力 kN

| 模型编号 | 横向 | 纵向 |
|------|--------|--------|
| 1 | 26 243 | 26 128 |
| 2 | 28 121 | 26 429 |
| 23 | 28 953 | 26 124 |
| 24 | 28 884 | 25 666 |
| 25 | 27 607 | 24 322 |
| 26 | 25 447 | 24 551 |

BRB 支撑设在结构下部时,底部震剪力增加,最大增幅为 10.3%,当设置在顶部时,底部地震剪力减小,降幅为 3%;结构纵向底部地震剪力最大降幅为 7%,从趋势上判断 BRB 支撑单独设置在顶部,比单独设置在底部,对地震作用减小效果明显。结构底部使用 BRB 支撑后,地震作用增加,笔者分析因素如下。

1) 主厂房横向:以模型 1 为例,支撑占结构总抗侧刚度比例较大,结构整体变形成弯曲型或以弯曲为主的剪弯型,如图 4 所示。

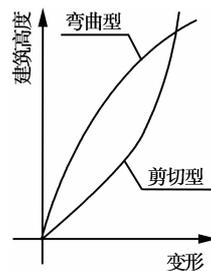


图 4 结构变形曲线

当底部支撑刚度削弱,底部变形剪切型趋势增加,中上部位仍以弯曲型为主,即结构主振型位移量呈增大趋势。根据振型分解法计算原理,结构底部

剪力将增加。

当继续削弱上部支撑刚度, 结构顶部变形剪切型趋势增加, 且结构刚度竖向分布趋于均匀, 到某临界点后, 采用振型分解法计算结构底部地震剪力结果将类似于底部剪力法, 底部地震剪力将随周期增加而降低。

当仅削弱结构顶部刚度时, 顶部弯曲变形趋势增加, 底部地震剪力将呈减小趋势。

2) 主厂房纵向: BRB 支撑对纵向影响类似于横向, 但由于纵向柱列较多, 框架侧刚贡献比例高于横向, 初始变形中纵向剪切型占比高于横向, 所以稍微调整就出现了底部地震剪力减小, 并且效果明显。

3) 高振型影响: 结构大部分振型周期小于场地土特征周期 0.65 s, 当结构刚度削弱幅度不大时, 大部分振型周期仍然在反应谱曲线的平段上, 地震水平影响系数没有发生变化, 且刚度减小, 振型位移大的振型参振质量(如: 振型 2)会有所增加, 从而计算层地震剪力将增加。

本实例结构纵横方向刚度均较大, 仅考虑较小地震作用, 零星布置 BRB 支撑时, 宜布置在结构上部楼层, 若设置在下部楼层作用小, 甚至会起到反作用。整体布置 BRB 支撑时, 宜追求“下刚上柔, 侧刚均匀变化”。

1.5 消除薄弱层作用

布置 BRB 支撑可用于消除薄弱层危害。电厂主厂房常出现上部某楼层刚度或抗剪强度偏大, 结构本身有薄弱层、软弱层出现, 可将 BRB 支撑设置在刚度偏大楼层, 减小该层刚度, 起到消除薄弱层、软弱层的作用。如果结构本身无薄弱层, 使用 BRB 支撑时, 应当注意避免因结构刚度变化造成结构出现新薄弱、软弱层。

1.6 调整框架地震剪力作用

根据《抗规》8.2.3 条, 框架分配得到“地震剪力”需要按 $\min(0.25Q, 1.8V_{\max})$ 调整计算。由于支撑抗侧刚度较大, 分配得到层地震剪力较多, 造成框架梁柱计算多由调整计算控制。

引入 BRB 支撑调整支撑与框架侧刚比例, 可使 $\min(0.25Q, 1.8V_{\max})$ 数量级减小, 从而使“调整计算模型”与“带支撑计算模型”中框架柱应力比趋近, 减少框架柱冗余度。并通过 BRB 支撑本身高延性特性来保障柱冗余度降低后, 框架整体抗震性能满足规范要求。

1.7 解决人字支撑不平衡力

根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 第 8.2.6-2 条及《火力发电厂土建结构设计技术规

程》DL5022-2012 第 11.5.7 条要求, 带人字撑的梁设计时应考虑支撑不平衡力或按支撑退出工作的简支梁验算。通常情况验算结果将大于整体计算结果, 甚至偏差非常大, 显得很经济。由于工艺布置原因, 布置人字撑不能避免时, 可考虑使用 BRB 人字支撑, 由于 BRB 支撑在结构性能点以前不会出现屈曲破坏, 则梁中点不会出现不平衡力, 解决了带人字撑框架梁计算偏大问题。图 5 以除氧器大梁为例, 简要说明 BRB 支撑的作用。表 3 为除氧器大梁对比表。

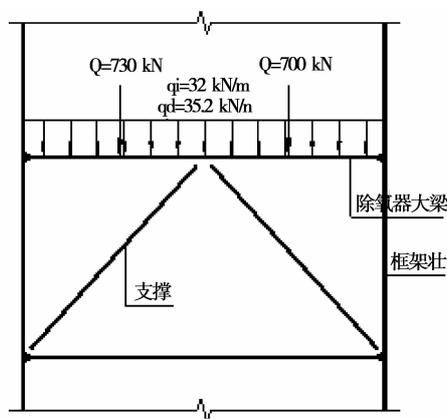


图 5 除氧器大梁人字撑布置

表 3 除氧器大梁对比表

| 方案 | 除氧器大梁计算截面 | 应力比 |
|----|-----------------|-----------------|
| 1 | H1200×450×22×36 | 0.86 |
| 2 | H800×400×22×30 | 0.559/0.95(注 2) |

注:

1. 方案 1 考虑不平衡力, 按重力荷载代表值作用下的简支梁计算; 方案 2 不考虑不平衡力, 按整体模型计算。
2. 应力比 0.559 为整体计算应力比, 0.95 为框架地震剪力调整计算应力比。

根据表 3 对比, 对大荷载框架梁采用人字 BRB 支撑有较好的经济性, 所以除氧器大梁、煤斗大梁等可优先选择 BRB 人字支撑。

1.8 BRB 支撑布置原则

根据上文数据、大量试算及市场调查, 电厂主厂房 BRB 支撑布置建议遵循以下原则:

由于 BRB 支撑价格受屈服承载力、屈服位移、设计长度控制, 其造价与上述因素并非完全线性变化关系。按支撑芯材重量估算, 成品支撑单价大致为芯材(模型中 BRB 支撑用其芯材等效截面模拟)价格的 3 倍(本文用于概念性估算, 实际造价应当通过厂家核实)。根据 BRB 支撑厂商初步报价分析, 弹性承载力在 12 000 kN 以内时, 支撑内力越大综

合造价越经济,所以结构布置宜尽可能采用高承载力 BRB 支撑,减少支撑数量。

BRB 支撑不涉及到稳定计算,可不考虑芯材长细比限制,支撑形式可更加灵活,受力允许时可尽量采用单斜撑。

框架横向:由于主厂房横向仅有两列框架柱,横向刚度主要由支撑布置形式决定,对设置较多横向支撑的厂房,仅直接将普通支撑替换为 BRB 支撑,减小地震作用整体效果不明显,此时 BRB 支撑宜高位布置。采用 PushOver 分析结果可证明框架横向有较大弹性储备及抗倒塌能力储备,所以从经济性角度出发,主厂房横向无需刻意追求滞回性能而使用 BRB 支撑,可优先考虑设置普通支撑、荷载小的轴线可不设置支撑,仅对荷载较大的横向框架梁,设置人字 BRB 束撑,以减小框架梁跨度,可优化框架梁截面提高厂房空间利用率。

框架纵向:主厂房纵向柱列数量多,支撑数量较少,框架侧刚由框架柱及支撑共同提供,设置 BRB 支撑减小地震作用效果明显。支撑布置宜结构底部宜多设几道 BRB 支撑,以上逐渐减少,到顶部可只设置普通支撑。为减少 BRB 支撑数量,纵向柱列间总支撑道数应尽可能少,支撑形式可使用单斜撑。

根据本条主从厂房纵横向框架调整示意如图 6、7 所示。

1.9 Pushover 推覆分析

从弹性分析角度已印证了,使用 BRB 支撑具有一定经济效果。但使用 BRB 支撑将减小结构整体刚度,理论上结构稳定将降低,结构抗震性能是否满足要求仍存在疑问。为了验证设置 BRB 支撑框架抗震性能,采用 Pushover 方法检验结构罕遇地震下整体抗倒塌能力,以及推覆过程中梁、柱、支撑塑性开展过程是否符合延性要求。按 1.8 条原则调整支撑布置后,推覆分析结果如图 8、9 和表 4~7 所示。

表 4 BRB 支撑一框架模型框架横向推覆性能点参数

| 参数名称 | 数值 |
|-------------------|--------|
| PushOver 底部总剪力/kN | 82 470 |
| 多遇地震 CQC 底部剪力/kN | 20 925 |
| 控制点位移/m | 0.07 |

表 5 BRB 支撑一框架模型框架纵向推覆性能点参数

| 参数名称 | 数值 |
|-------------------|--------|
| PushOver 底部总剪力/kN | 62 950 |
| 多遇地震 CQC 底部剪力/kN | 18 343 |
| 控制点位移/m | 0.24 |

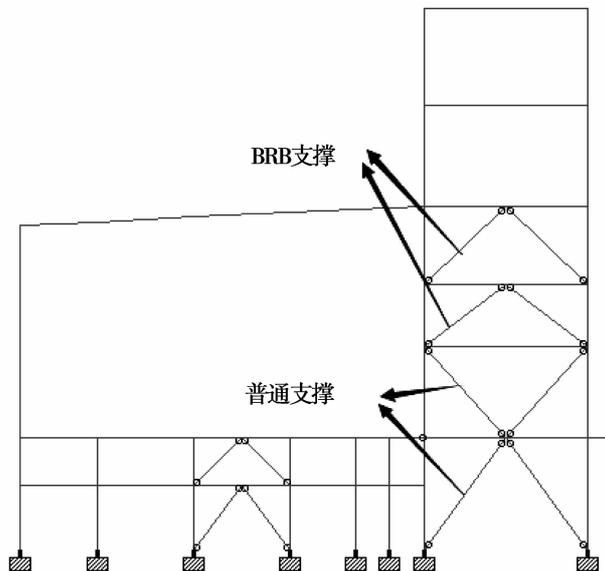


图 6 BRB 支撑横向布置示意

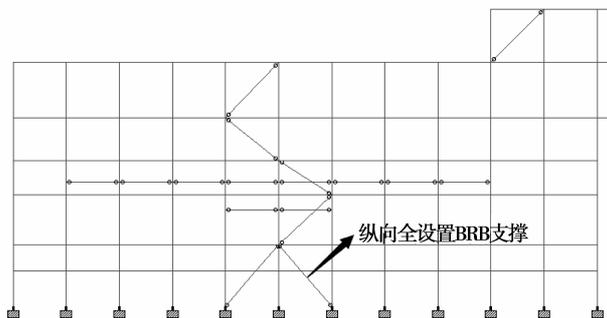


图 7 BRB 支撑纵向布置示意

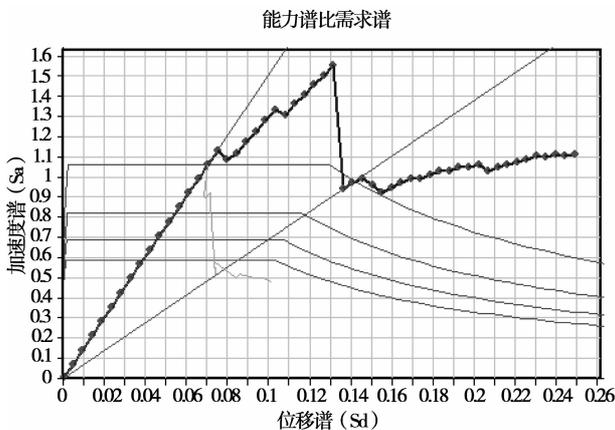


图 8 BRB 支撑一框架模型横向推覆性能曲线

表 4、表 5 数据表明,Pushover 底部剪力为多遇地震底部剪力 3~4 倍,位移角满足《抗规》罕遇地震弹塑性位移角要求,即结构抗倒塌能力满足要求。

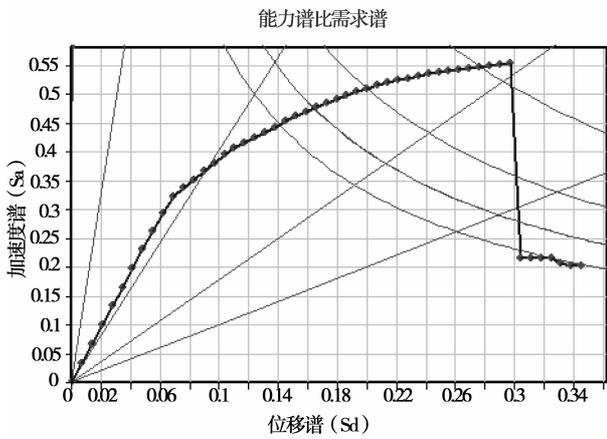


图 9 BRB 支撑一框架纵向推覆性能曲线

表 6 BRB 支撑一框架模型框架横向性能点处, 较开展状态

| 层 | 弹性 | 铰状态 | | |
|---|-----|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | IO ^[1] | LS ^[1] | CP ^[1] |
| 1 | 991 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 420 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 306 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 376 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 122 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 32 | 0 | 0 | 0 |

表 7 BRB 支撑一框架模型框架纵向性能点处, 较开展状态

| 层 | 弹性 | 铰状态 | | |
|---|-----|-----|----|----|
| | | IO | LS | CP |
| 1 | 983 | 8 | 0 | 0 |
| 2 | 418 | 2 | 0 | 0 |
| 3 | 304 | 2 | 0 | 0 |
| 4 | 360 | 5 | 0 | 0 |
| 5 | 122 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 32 | 0 | 0 | 0 |

注: 表 7, IO 铰均在支撑部位开展, 框架为弹性。

从表 6、表 7 塑性铰开展情况开, 此 BRB 支撑一框架符合塑性铰延性开展特征, 满足抗震性能要求。

1.10 经济性比较

表 8 普通支撑一框架与 BRB 支撑框架用钢量对比

| 模型名称 | 框架柱 | 框架柱 | 普通支撑 | BRB 支撑 |
|----------|-----|-----|------|--------|
| 普通支撑一框架 | 857 | 695 | 377 | 0 |
| BRB 支撑框架 | 644 | 643 | 114 | 97 |

注: 本表中框架梁柱均指主厂房除氧煤仓间框架梁柱, 不含汽机房、A 列、汽机平台。

2 结 论

研究表明, 设置 BRB 支撑对框架梁柱有优化作用, 整体经济效益受制于 BRB 支撑的数量。当支撑数量占比较大时, 整体经济效益比普通支撑略有优势或持平, 当初始模型支撑占比较少时, 有较好的经济效益。

以安全第一, 经济优先原则, BRB 支撑推荐布置方式如下:

1) 结构布置应尽可能采用高承载力 BRB 支撑, 减少支撑数量。

2) 框架横向可优先考虑设置普通支撑、荷载小的轴线可不设置支撑, 仅对荷载较大的横向框架梁设置人字 BRB 支撑。

3) 框架纵向纵向支撑形式推荐采用单斜撑, 尽可能减少 BRB 支撑数量。

4) 使用 Q345 芯材, 可略降低 BRB 支撑本身造价, 此时应注意屈服位移是否满足性能要求。

以抗震性能优先原则, 可考虑设置 BRB 支撑, 利用其滞回性能好的特点, 来提高结构延性, 增强抗倒塌能力, 对震后及时回复功能或维修成本有较高的综合效益。BRB 支撑宜设置在内力较大部位, 对重要构件起到“保险丝”的作用。

3 展 望

根据本次研究经济价值优化趋势表明, 支撑在总用钢量占比越小, 优势越明显, 故双框排架主厂房使用 BRB 支撑经济价值将优于单框架, 后续可进一步研究。

对接框架一BRB 支撑结构, 综合抗震性能比铰接框架一普通支撑结构有较大提高, 应用于高烈度地区有一定可行性, 且具有较好的经济前景, 值得进一步研究。

参考文献:

[1] FEMA. Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356 [R]. [S. l.] FEMA, 2000.

(编辑 郑 洁)