

文章编号: 1000-1301(2005) 01-0067-09

弦支穹顶结构的抗震性能研究

崔晓强¹, 郭彦林²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:弦支穹顶是一种受力性能优良的结构体系,它综合了单层网壳结构和索穹顶结构的优点,详细分析了影响弦支穹顶结构自振特性的各类参数,指出了边界条件对结构抗震性能的决定性影响。研究表明:当采用径向滑动边界时,即边界节点竖向和法向受到约束而容许径向在水平面滑动时,局部布索的弦支穹顶具有较佳的抗震性能;当边界条件相同时,弦支穹顶在水平地震和竖向地震作用下反应相似,只是程度上不同。

关键词:弦支穹顶;自振特性;抗震性能

中图分类号: P315.95

文献标识码: A

Seismic behaviors of suspension-dome structure

Cui Xiaoliang¹, Guo Yanlin²

(1. School of Civil Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Civil Engineering Department Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract As a new type of structural form, the suspension-dome structure combines both benefits of a single layer reticulated shell structure and a cable-dome structure. The parameters influencing the free vibration behavior of suspension-dome structure are also investigated theoretically. According to the time history analysis results, it is pointed out that the boundary condition is the main influence factor of the seismic behavior. The results obtained demonstrate that the partial suspension-dome structures show good seismic behavior when the boundary joints are only fixed in vertical and tangential directions. When the boundary conditions are the same, the suspension-dome structures have the similar seismic response in different level under horizontal earthquake action and vertical earthquake action.

Key words: suspension-dome structure; free-vibration behavior; seismic behavior

引言

地震时地面的运动过程非常复杂,地震的强度、频谱和持续时间等受震源机理、地基条件影响极为不同,且不同结构体系的抗震性能也存在较大的差别。大跨度屋盖结构体系,具有不同于其它结构体系的特点^[1~4]。M kawaguchi于 1993 年提出的弦支穹顶结构体系是一种综合了单层网壳和索穹顶结构优良性能于一体的新型结构形式^[5~6]。

如图 1 所示,由单层网壳结构(a)和预应力布索层(b)组成的弦支穹顶(c)具有优良的静力性能,预应力布索层的存在,提高了单层结构极限承载力,增加结构刚度,减小环梁内力。由于其发展的时间比较短,所以这种结构体系抗震性能的研究相对较少,只有少数文章涉及这个问题^[7~8]。

收稿日期: 2003-12-03

基金项目: 中国博士后基金项目(2003034275);上海市青年科技启明星计划项目(QMX1469)

作者简介: 崔晓强(1973-),男,博士,主要从事大跨度钢结构理论应用与研究。

由于弦支穹顶是由其上部壳体与预应力布索层结合而成的,所以弦支穹顶的特点就在于预应力布索层能否改善结构和多大程度上改善结构的力学性能。以下以弦支穹顶的上部网壳为参照对象,采用非线性有限元方法对弦支穹顶结构的抗震性能进行对比研究。

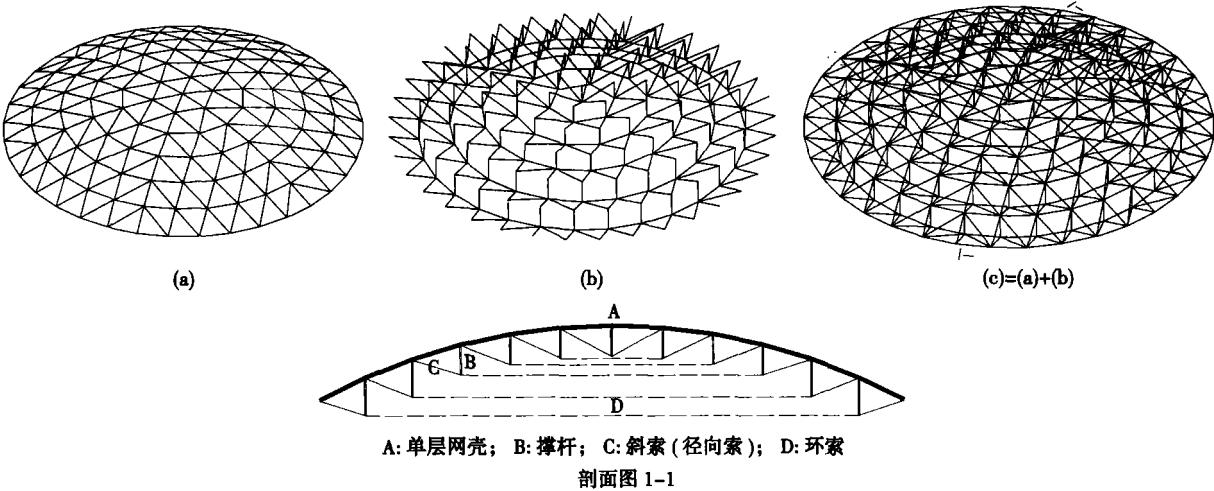


图 1 弦支穹顶结构组成

1 弦支穹顶结构的自振特性

多自由度体系的无阻尼自由振动方程是:

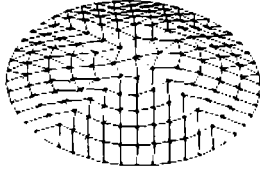
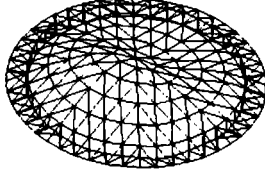
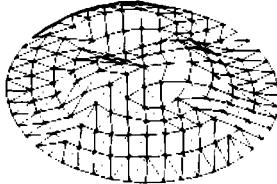
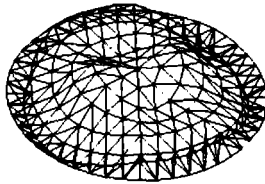
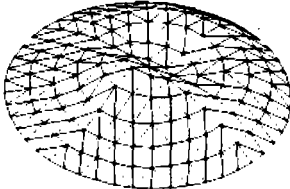
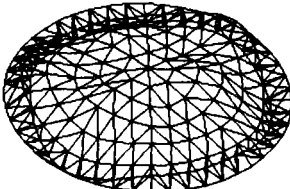
$$M\ddot{U} + KU = 0 \tag{1}$$

采用 Block Lanczos方法求解式(1)。影响网壳结构自振特性的参数有跨度、矢跨比、屋面荷载及支座刚度等。同时由于弦支穹顶布索层的存在,结构的自振特性必然还受到结构布索层数撑杆和斜索面的夹角、预应力等的影响。不作特别说明,结构分析假定边界节点采用固定铰支承约束。

1.1 基本振型

布索层的存在会不会改变弦支穹顶结构的自振特性,是需要首先关注的问题。如表 1 所示,网壳结构的

表 1 凯威特型单层网壳和对应弦支穹顶 SD1 (布置最外一圈布索层) 的振型和周期的对比

| | |
|---|--|
|  |  |
| $T_1=9.364s$ | $T_1=9.355s$ |
|  |  |
| $T_2=10.643s$ | $T_1=10.264s$ |
|  |  |
| $T_1=10.758s$ | $T_2=10.384s$ |

频率是非常密集的,布索层的存在基本上不改变结构的振型,只是改变了频率的大小。因此,弦支穹顶的频率是频率密集型结构。

1.2 结构参数对频率的影响

(1) 布索层数的影响

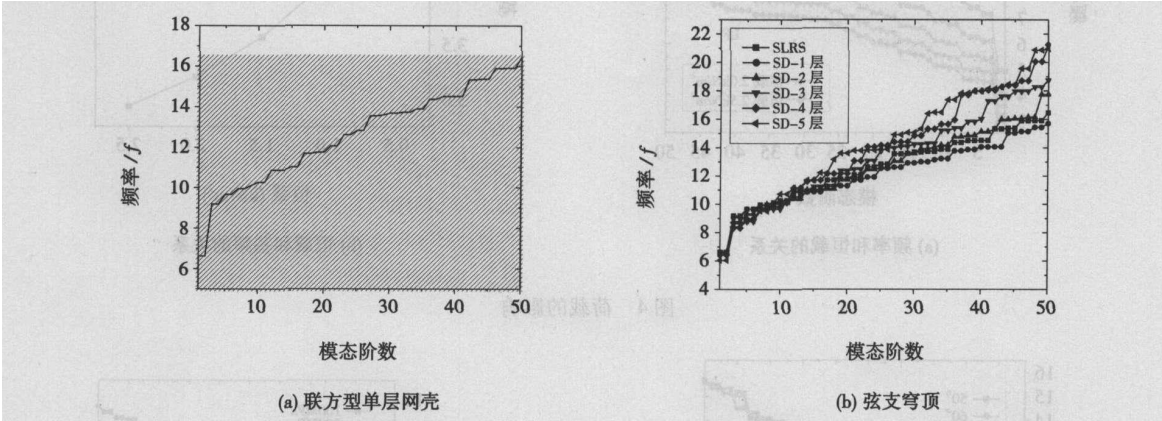


图 2 布索层数影响

以下选取 40m 跨度, 0.125 矢跨比, 撑杆与同一节点斜索构成平面夹角 (α) 为 70° 的联方型弦支穹顶^[9]为研究对象进行分析。

如图 2 所示(图中 SLRS 表示单层网壳, SD 表示弦支穹顶, n layers 表示 n 层布索层), 布索层数的不同, 并不改变结构频率密集的特性。由于结构的对称性, 结构频率通常成对出现, 布索层数对基频的影响很小; 结构的前 1, 2 和 3, 4 的频率跳跃较大, 其后则比较平缓。布索层数对弦支穹顶结构基频影响不大, 但对高阶频率产生了一定的影响。特别是当频率阶数大于 15 时, 只有一圈布索层的弦支穹顶的频率小于对应阶数下的单层网壳的频率。当布索层数大于 1 时, 弦支穹顶的频率高于对应阶数下的单层网壳的频率。布索层数越多, 高的越多。但结构布索层数的多少并没有本质上改变结构的自振特性。另外, 研究表明, 对于中小跨度的弦支穹顶, 布置最外一圈布索层的局部弦支穹顶形式较之于满布索的弦支穹顶, 不仅布索层数量少, 而且承载力和刚度几乎没有降低^[9]。基于以上原因, 以布置最外一圈布索层的局部弦支穹顶形式为研究对象, 对矢跨比、荷载、布索层参数对结构自振特性的影响进行分析。

(2) 矢跨比的影响

如图 3 所示, 由于矢跨比增大, 引起单层网壳刚度增大, 而使弦支穹顶的刚度增大的效果是非常明显的。矢跨比的增大, 并不改变各阶振型的变化趋势。矢跨比要比布索层数对结构自振特性的影响大得多。

(3) 荷载的影响

以恒载的大小作参数来分析, 得到图 4 所示的结果。很明显, 恒载越大, 结构频率越低。结构的基频随着外荷载的增大而减小, 荷载越小, 下降越慢。

(4) 布索层参数的影响

如图 5 所示, 当撑杆和斜索面的夹角 (α) 大于 60° 时, α 的变化对结构频率的影响不显著。但是当结构撑杆和斜索面夹角 (α) 为 50° 时, 结构的自振高阶频率似乎有所突变, 高阶频率出现一个很长的平台, 且有显著降低, 布索层数越多, 这种现象越明显。

如图 6 所示, 预应力对结构的自振特性基本上没有影响, 其它如拉索截面和撑杆截面刚度对于结构的自振特性也几乎没有影响, 不同布索层数的分析结果也是如此。

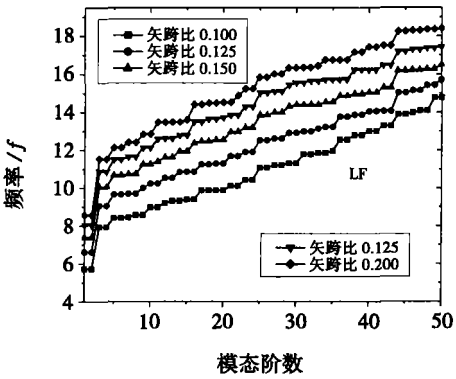


图 3 矢跨比影响

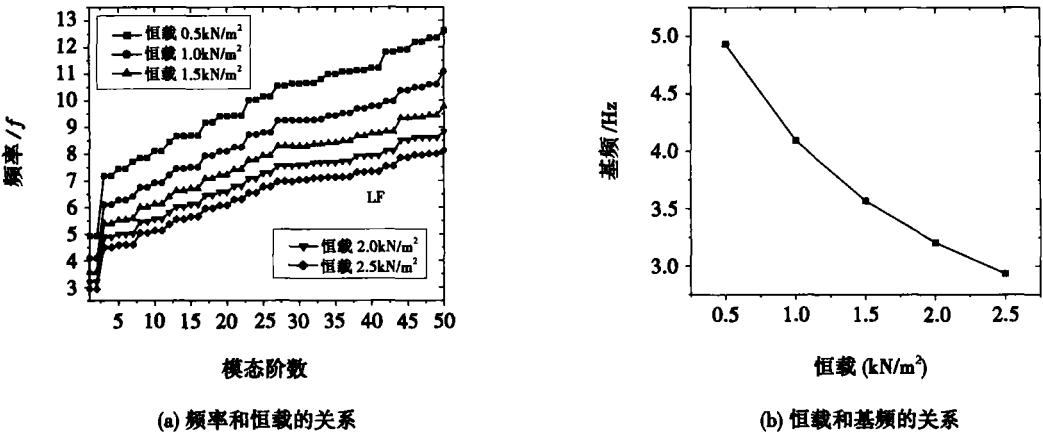


图 4 荷载的影响

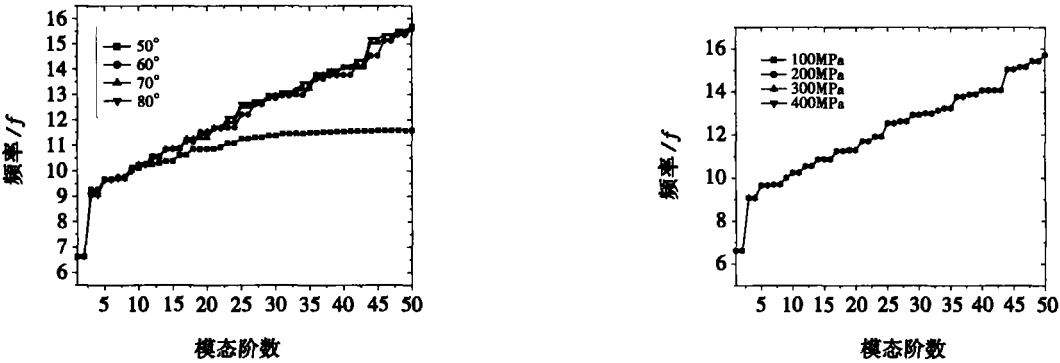


图 5 撑杆角度(α)的影响

图 6 预应力的影响

1.3 边界条件对频率的影响

结构在实际应用中,为了兼顾抗震和承载能力的需要,也会采用弹性边界条件,对于弦支穹顶结构体系而言,通常会采用在水平径向具有一定刚度 K 的弹簧支座。因此其边界条件大致可以分为 3 类:径向滑动支座,弹簧支座(边界节点沿径向水平面内设置弹簧支承)和固定铰支座。如图 7 所示,当弹簧刚度小于某一个 K 值时,对结构基频的影响基本上是线性的。当弹簧刚度大于这个值时,其影响程度会大幅度减弱,此时弹簧刚度的增加,对结构基频的影响很小。

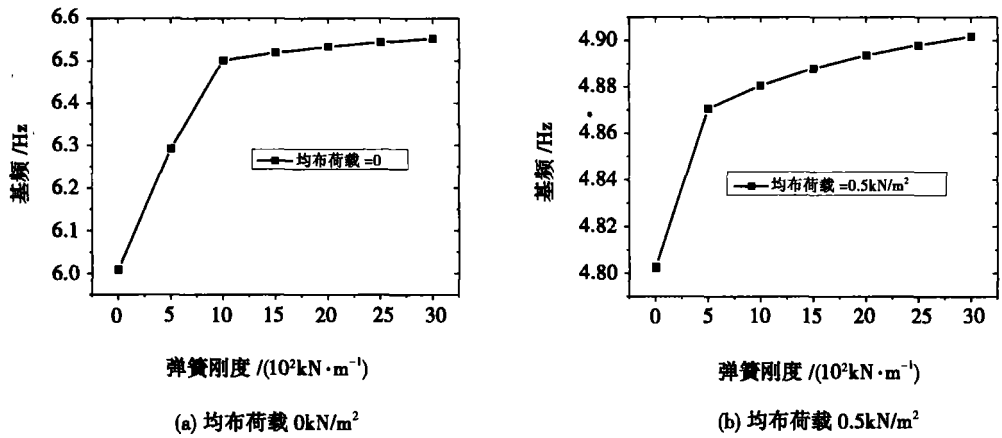


图 7 弹簧支座刚度对结构基频的影响

由于弦支穹顶同样属于频率密集型结构,结构并不是主要受第 1 振型的控制,而是受前 N (N 一般情况下较大) 阶的影响。如图 8 所示,即使弹簧刚度 ($K=5\,000$ kN/m) 大到对基频没有太大影响时,当 $N>5$ 时的频率却与径向滑动条件下的对应频率更加接近。

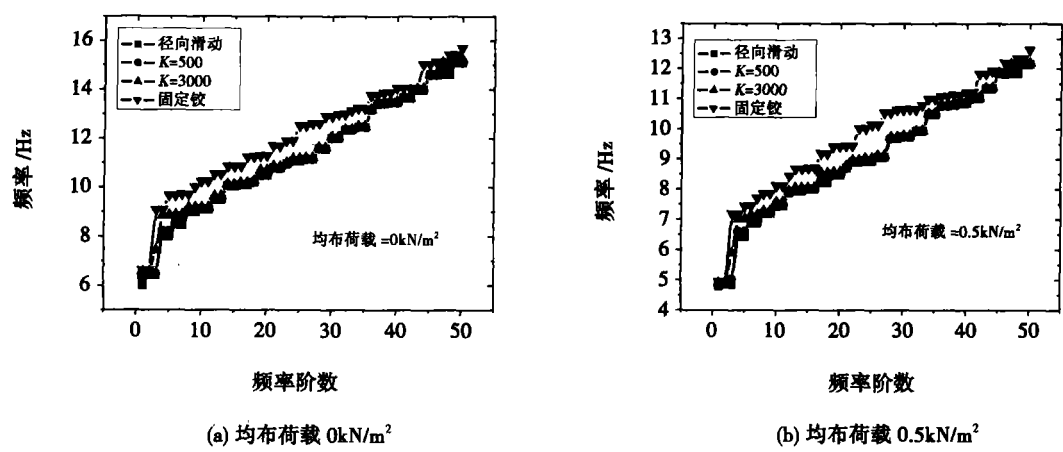


图 8 弹簧支座刚度 K 对结构前 50 阶频率的影响

2 弦支穹顶的抗震性能研究

多自由度体系的地震反应方程为：

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MU_g \tag{2}$$

式中 M、C、K:依次为结构质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；

\ddot{U} 、 \dot{U} 、U、 \ddot{U}_g :依次为质点加速度、速度、位移及地面运动加速度列阵。

在地震反应分析中,由于不能求出解析解,只能采用数值分析方法,将上式转变为增量方程：

$$M\Delta\ddot{U} + C\Delta\dot{U} + K\Delta U = -M\Delta\ddot{U}_g \tag{3}$$

采用 Newmark-β法对式(3)进行分析。

仍选取 40m 跨度, 0.125 矢跨比, 撑杆与斜索面夹角为 70°的联方型弦支穹顶为研究对象, 外荷载为 0.5kN/m²进行详细的讨论。为全面概括弦支穹顶的抗震性能, 以单层网壳(SLRS)、布索层数为 1 的局部联方型弦支穹顶(SD1)和满布索的联方型弦支穹顶(SD5)为对比研究对象进行比较分析, 如图 9 所示。

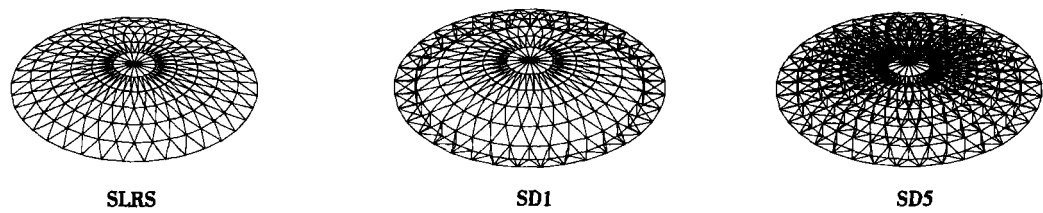


图 9 研究模型

考虑到结构周期和场地土的影响, 采用 ElCentro波和天津宁河波地震波进行计算。由于 2 种地震动对结构的影响规律基本类似, 以 ElCentro波的计算结果为例进行说明。网壳结构不同于网架结构的一个重要的方面是: 不仅受竖向地震作用的影响比较大, 而且受水平地震的影响也同样非常显著。由于布索层在相同边界条件下, 水平地震和竖向地震作用的结果相似, 因此, 以下只讨论水平地震反应分析的结果。

大量的计算和比较分析表明, 结构边界的约束情况对结构抗震性能的影响非常显著。因此分析结构水平地震响应时, 分别采用径向滑动支承和固定铰支承。

(1) 径向滑动条件

如图 10 所示, 在径向滑动条件下, SD5 和 SD1 的结构形式在地震动过程中的最大位移比对应的单层网壳最大位移小很多, 振动幅度也大幅度降低。这说明局部弦支穹顶和满布索的弦支穹顶在抵抗水平地震荷载时, 在结构刚度方面, 都大大提高了单层网壳的抗震性能。并且局部弦支穹顶的抗震性能要好于满布索的弦支穹顶。

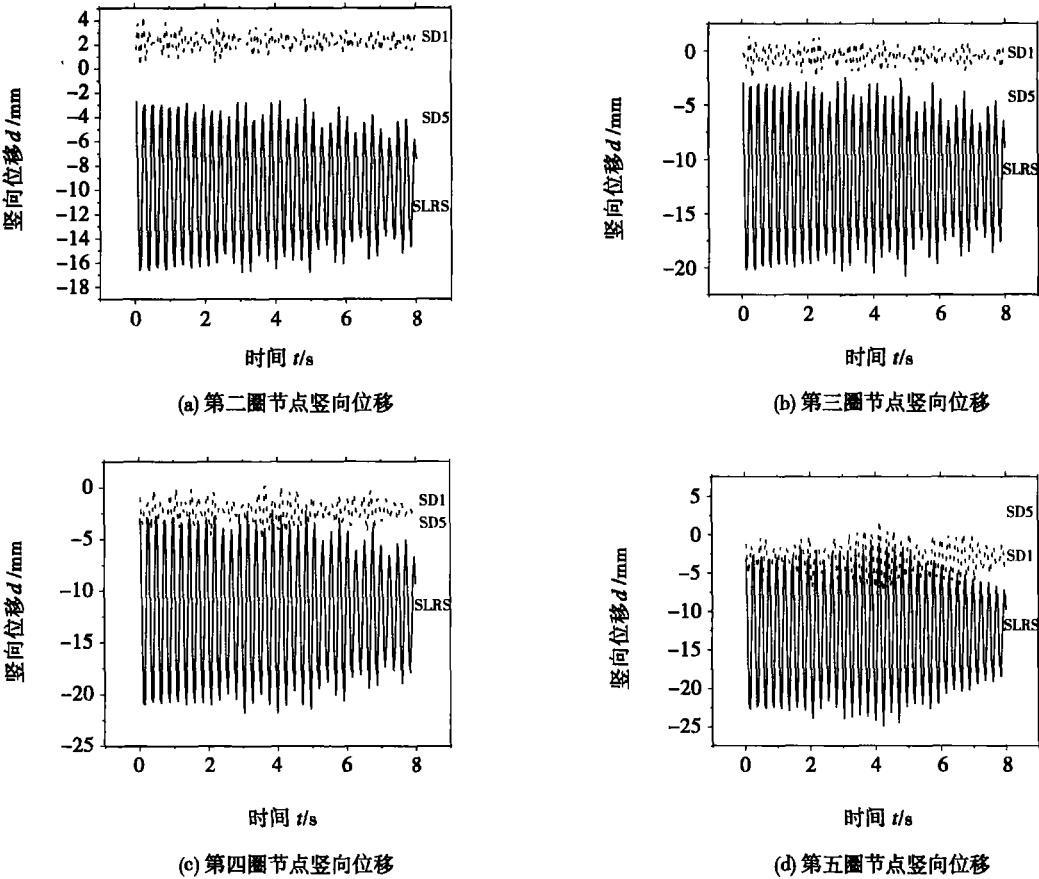


图 10 节点竖向位移

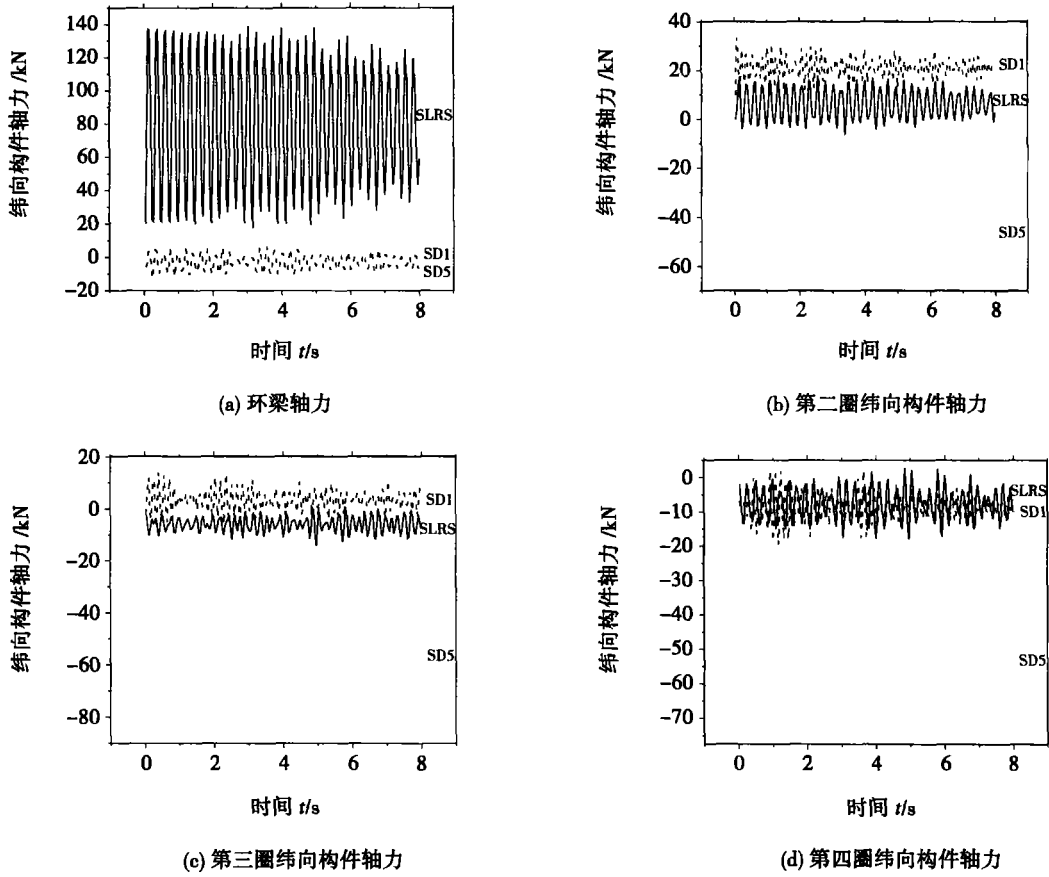


图 11 纬向构件轴力

如图 11所示,在控制纬向构件内力方面,局部弦支穹顶和满布索的弦支穹顶有较大的差别。相同的是,环梁的轴力和振动幅度都被大幅度降低;不同的是,对于内圈的纬向构件,局部弦支穹顶的振动幅度和单层网壳基本处于同一水平上,但满布索的弦支穹顶在水平地震荷载作用下,不仅使纬向构件的轴力增大,也使结构纬向构件的轴力振动幅度放大很多,这对于结构的影响是非常不利的。这方面的比较说明局部弦支穹顶较满布索的弦支穹顶更佳。

如图 12所示,在水平地震作用下,局部弦支穹顶能够较大地降低径向构件的轴力和振动幅度。虽然满布索的弦支穹顶(SD5)对径向构件内力的控制效果比局部弦支穹顶(SD1)差一些,但也能够使径向构件内力和振幅有较大幅度的下降。并且是越靠近外周边界的径向构件其控制效果越好。当构件比较靠近中心,其控制作用就比较小甚至没有了。

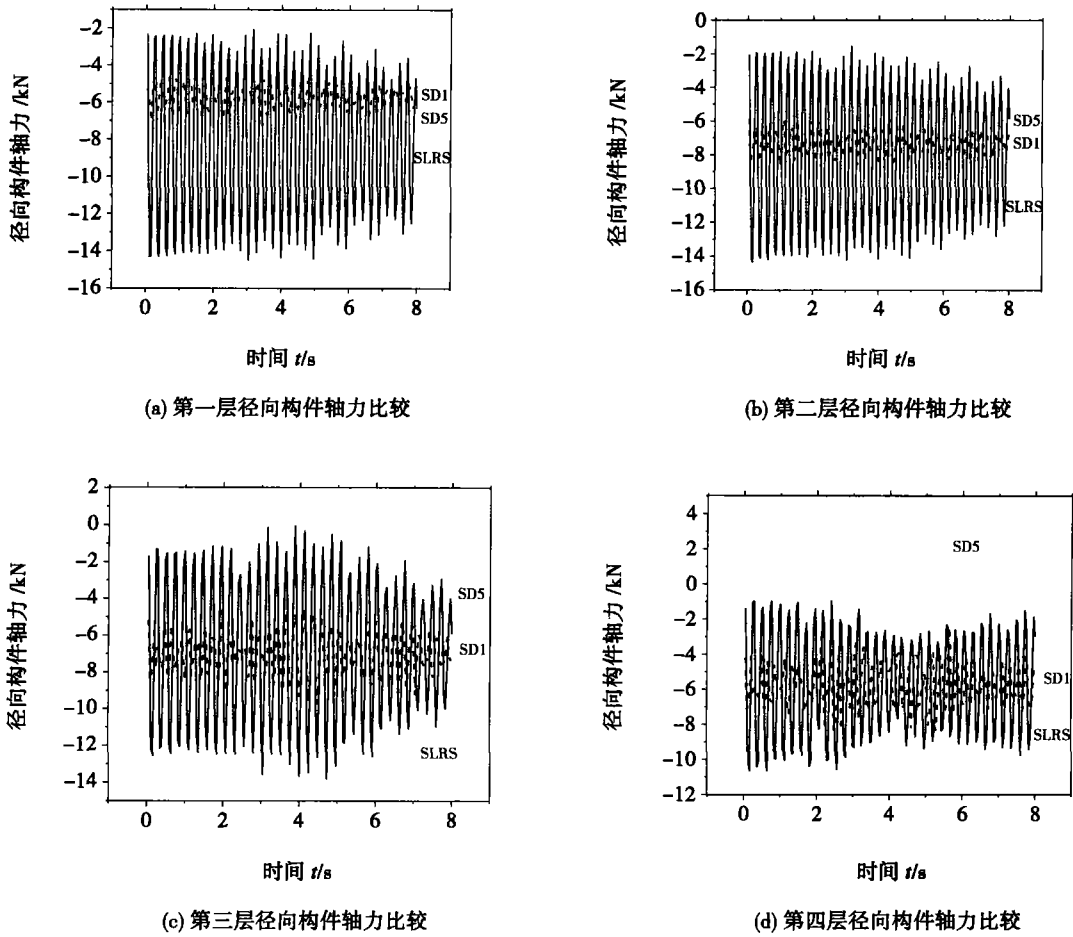


图 12 径向构件轴力比较

(2) 固定铰支承条件

如图 13所示,与径向滑动边界条件相比,固定铰支承边界条件下,结构的地震反应有了本质的变化。局部弦支穹顶(SD1)和满布索的弦支穹顶(SD5)都不能减小结构位移的振幅。满布索的弦支穹顶(SD5)不仅使结构的位移产生较大的增长,且振动幅度也有很大的增加。所以在固定铰支承条件下,满布索的弦支穹顶抗震性能反而比单层网壳差。

如图 14所示,在固定铰支承条件下,弦支穹顶纬向构件的轴力和振幅都比单层网壳大,特别是满布索的弦支穹顶(SD5)。而局部弦支穹顶(SD1)的纬向构件的轴力虽然也被放大,但幅度小于SD5。这与SD1、SD5、SLRS在水平地震作用下的位移反应一致。

如图 15所示,对于径向构件而言,局部弦支穹顶(SD1),满布索的弦支穹顶(SD5)和单层网壳(SLRS)的构件轴力在水平地震作用下处在同一振动波带范围内。SD5大幅度放大了单层网壳径向构件轴力的振动幅度,对结构产生了极为不利的影响。

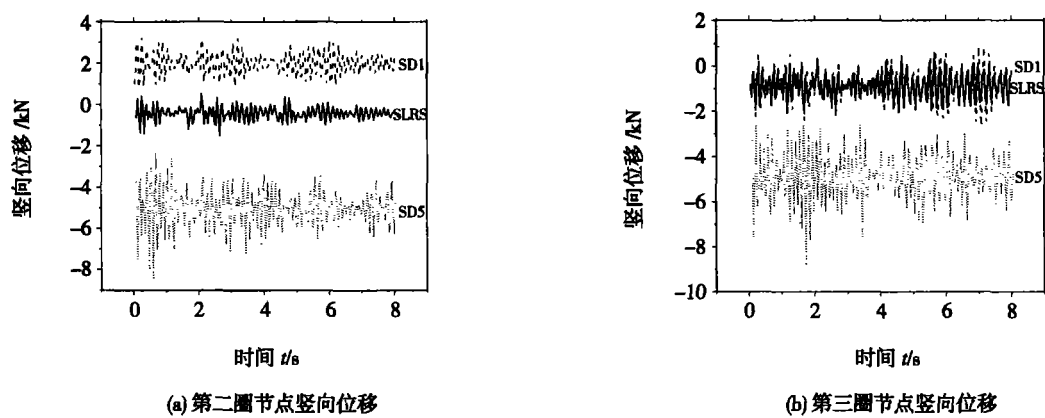


图 13 节点竖向位移比较

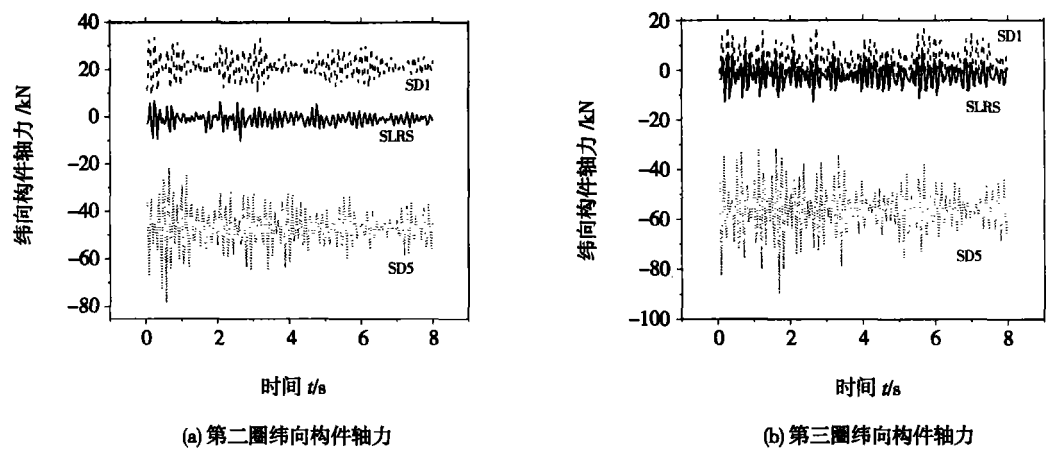


图 14 纬向构件轴力

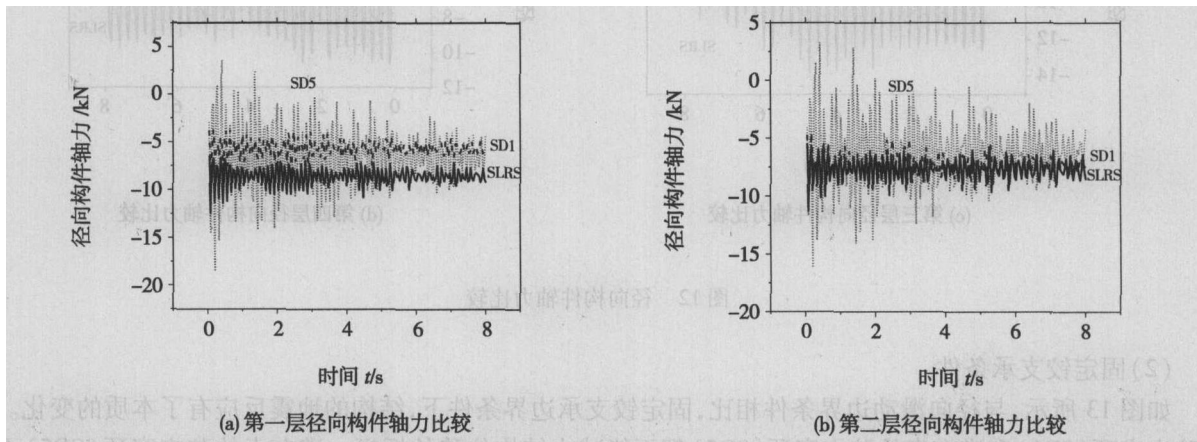


图 15 径向构件轴力比较

通过对固定铰支承条件下结构位移和构件轴力的地震影响分析,得到如下结论:固定铰支承的条件下,布索层对结构抗震性能的影响不利。布索层层数越多,预应力水平越高,影响越不利。

3 结论

(1)弦支穹顶也是自振频率密集型结构。拉索预应力和截面对结构的自振特性的影响较小,撑杆与斜

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

索面的夹角对结构自振特性的影响较大。

(2)边界条件对结构地震响应的影响是决定性的。当边界条件为径向滑动时,弦支穹顶抗震性能好于对应的单层网壳,且布索层数越少,抗震性能越好。当边界条件为固定铰支承时,弦支穹顶的抗震性能反而不如对应的单层网壳。

(3)当边界条件相同时,弦支穹顶结构在水平地震和竖向地震作用下的反应是相似的,只是程度上不同。

(4)弹簧支座刚度对结构基频的影响比对高阶频率的影响大。当弦支穹顶支座的弹簧刚度增大到使其基频与固定铰支承条件下的基频几乎相等时,其高阶频率($N>5$)却与径向滑动边界条件下的对应频率更为接近。

参考文献:

[1] Oren Vilnay, Paul Rogers Statical and dynam ical response of cable nets[J] . Intemational Journal of Solids Structures 1990, 26(3) : 299~312.

[2] Nicholas F. Morris Dynam ic analysis of cable-stiffened structures[J] . J. Struct. Div., Proceeding of ASCE, 1974, 100: 971~981.

[3] 周岱.斜拉网格结构的非线性静力、动力和地震响应分析[D]:杭州:浙江大学, 1997.

[4] 蓝天,张毅刚.大跨度屋盖结构的抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社, 2000.

[5] Mamoru Kawaguchi Masaru Abe Tatsuo Hatato et al Hiroyuki Yoshida and Yoshin ichi Anma on A Structural System "Susten-dome" System [A] . Proceedings of IASS Symposium[C] . Istanbul 1993. 523~530.

[6] Mamoru Kawaguchi Masaru Abe Tatsuo Hatato et al Hiroyuki Yoshida and Yoshin ichi Anma Structural Tests on A Full-size Suspen-dome Structure[A] . Proceedings of IASS Symposium[C] . Atlanta: 1994. 383~392.

[7] Mamoru Kawaguchi Masaru Abe Tatsuo Hatato et al Hiroyuki Yoshida and Yoshin ichi Anma Structural Tests on A Full-size Suspen-dome Structure[A] . Proceedings of IASS Symposium[C] . Singapore: 1997. 431~438.

[8] Mamoru Kawaguchi Masaru Abe Ikuo Tatem ichi Design, test and realization of "susten-dome" system[J] . Journal of IASS 1999, 40(131) : 179~192.

[9] 崔晓强.弦支穹顶结构体系静、动力性能研究[D].北京:清华大学, 2003.