

钢 - 混凝土组合薄壳屋盖的研究进展 ——施工阶段钢底壳的模型试验研究

滕锦光, 王汉

(香港理工大学 土木及结构工程系, 中国 香港)

摘要: 钢 - 混凝土组合薄壳屋盖 (Comshell 屋盖体系) 由兼作永久模板并替代钢筋的薄壁加劲钢底壳和现浇混凝土两部分组成。薄壁钢底壳由模块化单元件通过螺栓连接而成, 单元件呈无盖扁盒状, 由底板及周边板组成, 其周边板在钢壳上构成两个方向的薄壁加劲板。这一新体系保留了混凝土薄壳屋盖的所有优点, 又不需要使用临时模板, 并大幅减少临时支撑。本文对这种新型结构体系及其各种可能的破坏模式进行了简单介绍, 并给出了针对该结构体系施工阶段稳定性所进行模型试验的主要结果。

关键词: 薄壳屋盖; 混凝土薄壳; 组合结构; 模块化结构; 屈曲

中图分类号: TU 398, TU 33

文献标识码: A

文章编号: 1671 - 9379(2005)03 - 0009 - 07

Recent Research on Steel Concrete Composite Shell Roofs: Buckling Experiments on the Steel Base Shell during Construction

TENG Jin-guang, WONG Hon-ting

(Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong, China)

Abstract: Steel concrete composite shell roofs (Comshell roofs) are formed by pouring concrete on a thin stiffened steel base shell which serves as both the permanent formwork and the tensile steel reinforcement. The thin steel base shell constructed by bolting together open topped modular units consisting of a base plate with surrounding edge plates is a steel shell with thin stiffeners in both directions. The new system retains all the benefits of thin concrete shells but eliminates the need for temporary formwork and minimises the required falsework. In this paper, the structural features and possible failure modes of this new structural system are first outlined. The results of a series of buckling experiments on model steel base shells under simulated wet concrete loading during construction are then presented.

Keywords: shell roofs; concrete shells; composite construction; modular construction; buckling

1 引言

混凝土薄壳结构作为大跨度屋盖的一种形式在世界各地得到了大量应用, 但近二三十年来其应用逐渐减少。主要原因在于混凝土薄壳的施工需要架设临时模板, 而薄壳成形后又需将其拆除, 此外混凝土浇注时还需设置临时支撑, 因此施工过程需要大量的劳动力而且成本很高。另一方面, 随着计算技术的发展和计算机的广泛应

用, 近年来在网架、网壳等其它空间结构的分析及设计技术方面有了长足的进步, 这也使混凝土壳体不再像二十世纪五、六十年代那样具有竞争力。

近几十年来, 世界各地对混凝土薄壳的建造方法也进行了各种尝试, 旨在省略临时模板的使用, 但总的说来成效都极其有限。Medwadowski 在文献[1]中对这些尝试进行了总结, 并指出“混凝土薄壳屋盖的施工成形仍存在巨大的、尚未解决的问题。应当毫无偏见地探索各种

收稿日期: 2003 - 12 - 01

作者简介:

滕锦光 (1964 -), 男, 博士、教授, 主要从事于 FRP 在土木工程中的应用和钢结构的研究, E-mail: cejgteng@polyu.edu.hk.

王汉 (1978 -), 男, 博士研究生, 广东晓士达复合材料建材(广东)有限公司研究与开发工程师, 主要从事于 FRP 在工程中的应用和大跨度钢 - 混凝土组合结构的研究。

新的方法”。混凝土薄壳屋盖成形技术的最新发展是由文献[2]提出的钢-混凝土组合薄壳屋盖技术——Comshell 屋盖体系,相信这一新型结构体系的开发将为解决混凝土薄壳的施工难题提供一种有效的方法。本文对这种新型结构体系及其各种可能的破坏模式进行简单介绍,并给出针对该结构体系施工阶段稳定性所进行模型试验的主要结果。

2 COMSHELL 屋盖体系

Comshell 屋盖是将混凝土浇筑入作为永久模板并替代钢筋的薄壁加劲钢底壳而成的一种钢-混凝土组合薄壳屋盖。钢底壳由模块化单元件通过螺栓连接而成,单元件则由平底板或微弯底板以及周边侧板组成的顶部敞开的盒子(图1)。采用不同形状的单元件可以组合形成不同形式的壳体,本文的讨论仅限于圆柱面屋盖,这是采用这种模块化方法最容易建造的壳体形式。

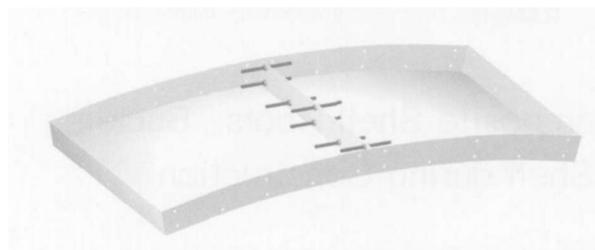


图1 模块化单元件及螺栓连接

用于圆柱面屋盖的模块化单元件,其中的两块周边侧板应与底板呈一定的夹角,这样当它们通过螺栓组装后就可形成一定曲率的曲面形状(图1、图2)。单元件的周边侧板上钻有螺栓孔以方便相邻单元进行螺栓连接,而由螺栓连接起来的周边侧板则构成了壳体两个方向上的加劲板(图2)。壳体的曲面可近似地由平底板的单元件构成,也可由底板微弯的单元件精确构成,采用微弯底板时所有周边侧板均与底板垂直。实际上,底板可以是凸的,也可以是凹的,若有需要还可以是小波纹状的,从而提高底板的局部稳定性。侧板的稳定性则可用附加卷边改善。

Comshell 体系具有以下特点:(1)单元件可在工厂大批量生产,只需几种标准尺寸及曲率的单元件就可方便地构成一定跨度及曲率的壳体;(2)运输及搬运容易;(3)由单元件构成的钢底壳具有许多由周边侧板形成的薄壁加劲板,从而大幅提高壳体的屈曲承载能力,施工过程中的临时支撑可大大减少;(4)可通过分阶段浇筑混凝土,避免因施工阶段屈曲承载能力的需要而导致用钢量过大;(5)加劲侧板可防止湿混凝土沿壳体表面向下流动;(6)加劲板及螺栓共同作为钢壳与混凝土之间的剪力连接件,因此通常不再需要焊以附加的抗剪连接件;(7)由于加劲板的上端与壳体上表面十分接近(仅有必要的混

凝土保护层),加劲板能提供一定的抵抗负弯矩的能力。加劲板也为铺设配筋(通常用钢筋网片作为构造配筋即可)起到保证准确定位的作用。

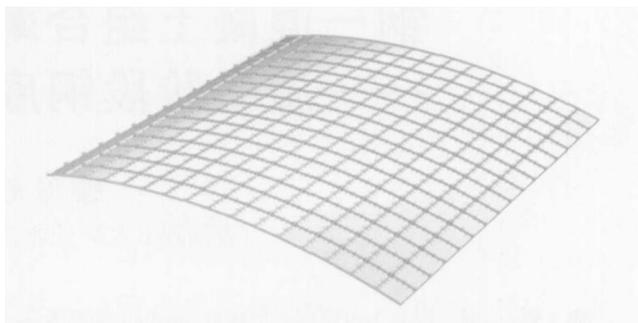


图2 由模块化单元件构成的钢底壳

通过采用适当的小波纹,钢底壳单元件的底板通常只需采用很薄的钢板就足以承受湿混凝土产生的荷载而不致产生过大的变形、应力,并避免局部失稳。由于钢板厚度很小,单元件可方便地通过冲压成形,确保精确的几何形状及尺寸。单元件可在地面组装成拱片再进行提升,以保证对拼装后壳体几何形状的严格控制,同时减少对临时支撑的需求。

3 主要破坏模式

为使 Comshell 体系在实际工程中得到广泛的应用,需要对该体系进行全面研究以深入了解其受力性能,并建立一套相关的设计方法。以下对该体系的主要破坏模式予以介绍。这些破坏模式,有的发生在施工阶段,有的发生在使用阶段。

3.1 施工阶段

在施工阶段,湿混凝土的自重作为荷载直接作用于钢底壳上。Comshell 体系的一个特点就是在施工过程中省去了临时模板并最大限度地减少了所需的支撑。因此,钢底壳在混凝土自重和其他施工荷载共同作用下的稳定问题,就成了 Comshell 体系在实际工程应用中的一个关键问题。钢底壳的破坏模式包括局部屈曲和整体屈曲两类。整体屈曲会引起钢底壳整体几何形状的变化及整个结构的倒塌。局部屈曲可分为单元件底板的屈曲和由周边侧板栓接形成的薄壁加劲板的屈曲。局部屈曲一般在弹性范围内发生,具有稳定的后屈曲路径,并不会导致即时的倒塌,但会导致过大的变形,从而影响壳体的视觉效果、适用性以及强度。同时,局部屈曲会通过和整体屈曲的相互作用而降低壳体的整体屈曲承载能力。因此,虽然整体屈曲比局部屈曲更为重要,但是后者也是不容忽视的。

这些屈曲模态控制着钢底壳的钢板厚度,从而影响整个体系的经济性。在不增加钢板厚度的前提下,提高

钢底壳屈曲荷载可采用以下几种方法:采用小波纹状底板、周边侧板增设水平翼缘板以及分阶段浇注混凝土^[2]。

3.2 使用阶段

壳体建成后,作用于结构上的主要荷载包括自重、雪荷载、风荷载,若壳体建于地震区还应包括地震作用。若壳体矢高较小,风荷载向上作用,则总体上对结构是有利的。对于大跨度的 Comshell 屋盖,如果建于寒冷地区,自重加雪荷载往往是最重要的荷载组合。在地震区,Comshell 屋盖的抗震性能应该得到足够的重视。使用阶段的破坏形式包括结构的整体失稳和单元件底板的单向失稳。这时,结构的整体稳定性和单元件之间的连接性能密切相关。

混凝土浇注完成后,底板承受着分布复杂的薄膜应力及弯曲应力。混凝土养护后,在附加荷载如雪荷载、支撑拆除、混凝土徐变等作用下,底板也承担相应的附加应力。底板处于双轴应力状态,除了弯曲应力,还承受面内拉、压应力的各种组合。应当注意的是,如果底板最终至少在一个方向是受压的,底板的单向屈曲就是一种可能的破坏模式。

对于钢筋混凝土薄壳来说,混凝土徐变会导致形状的变化而降低结构的稳定承载力。对于 Comshell 体系来说,因为钢底壳约束着壳体的整体形状,自重荷载下混凝土的徐变变形并不会导致壳体形状明显的改变,但徐变会导致钢底壳与混凝土壳之间的应力重分布,因而仍然十分重要。

4 施工阶段稳定性试验研究

如前所述,栓接钢底壳的稳定性是 Comshell 体系在施工阶段的关键问题。虽然对钢结构进行非线性稳定分析的数值方法已相当成熟,但 Comshell 体系中大量的节点构成数值模拟的难点。对钢底壳进行足尺试验研究,既费时又昂贵,暂无可能。即使是缩尺模型试验,也有较大的难度。因此,针对这一问题的最佳研究路径是采用少量的缩尺模型试验及节点试验同时结合数值模拟,建立可靠的数值模型,然后对壳体进行大范围的参数分析,最后提出设计方法。

基于上述的考虑,我们完成了一系列针对栓接钢底壳稳定性的模型试验。该系列包括三个模型试验,试件

A 和试件 B 用于研究局部屈曲,而试件 C 则用于研究整体屈曲。下面,将分别对这三个试验的过程及结果进行简要描述。

薄壳模型试验的一个难点是确定模型尺寸。表 1 列出了钢 - 混凝土组合壳原型的几何尺寸,同时也列出了基于以上考虑按 1:10 缩尺的三个钢底壳模型试件的几何尺寸。需要说明的是,由于周边侧板要容纳一到两排的螺栓,其高度无法按同比例缩小。同样,底板的厚度和边长也无法按相同的比例缩小。由于本次试验的目的在于得到与预期相符合的结构破坏形式及为将来的计算机数值模拟提供验证用的数据,其重点在于螺栓连接节点性能对钢底壳稳定性的影响。这些缩尺方面的问题,并不影响试验结果的价值。

4.1 试件的制作

钢底壳试件是由 40 个单元件用螺栓拼接而成,沿纵向和横向各有 5 行和 8 列单元件(图 3)。为方便引用,每行由一个英文字母表示,而各列则由阿拉伯数字标号。据此,各单元件可由所在的行与列编号,而加劲板则由相邻两单元件的编号表示。例如,单元件 C2 表示它位于 C 行第二列,而单元件 B4 和 C4 之间的周边侧板组成的薄壁加劲板则编为 B4 - C4。组成加劲板的两块侧板也可以通过适当的编号区分开来。例如,编号为 B4 - C4 的侧板位于单元件 B4 上,而编号为 C4 - B4 的侧板则位于单元件 C4 上。

钢底壳模型试验的三个试件分别由三种不同几何尺寸的单元件拼接而成(图 4)。单元件底板的尺寸皆为 300mm×300mm,周边侧板的高度则不同。试件 A 的单元件采用 60mm 高的周边侧板。这样,薄壁加劲板的局部屈曲就成为试件 A 较为可能发生的破坏模式,同时也使周边侧板能容纳两排螺栓及垫圈。螺杆(包括螺纹)、螺帽和垫圈的直分别为 6mm、10mm 和 18mm。试件 B 及 C 的单元件都采用 30mm 高的周边侧板,因此它们只能容纳一排螺栓及垫圈。同时,为了提高这两个试件薄壁加劲板的侧向稳定性,其单元件的周边侧板都增加了 10mm 宽的卷边。每个单元件中,两块侧板与底板呈一定的夹角,而另外两块则与底板垂直,这样组装后就得到表 1 所示曲率的钢底壳试件。这里不采用底板微弯的单元件,主要是为了减少实验室制作单元件的难度。

表 1 模型试验试件的几何尺寸(m)

尺寸	跨度/L	波宽/B	曲率半径/R	矢高/f	侧板高度/h	B/f	
原型	15.000	22.000	18.000	4.000	0.100	5.5	
试件	BSBS1	1.500	2.218	1.750	0.396	0.060	5.6
	BSBS2	1.500	2.218	1.750	0.396	0.030	5.6
	BSBS3	1.500	2.357	3.633	0.198	0.030	11.9

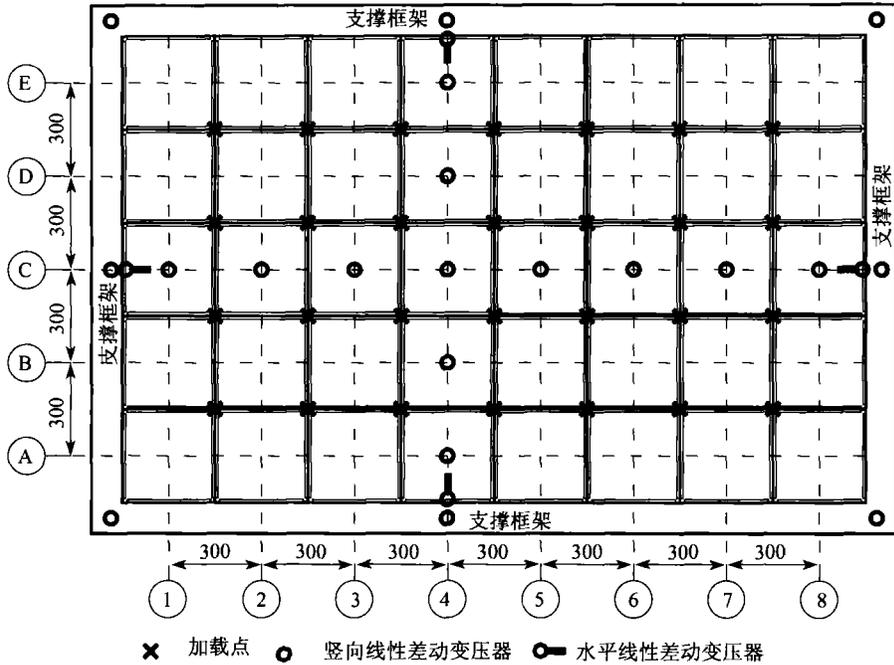


图3 钢底壳的组成及位移器的布置

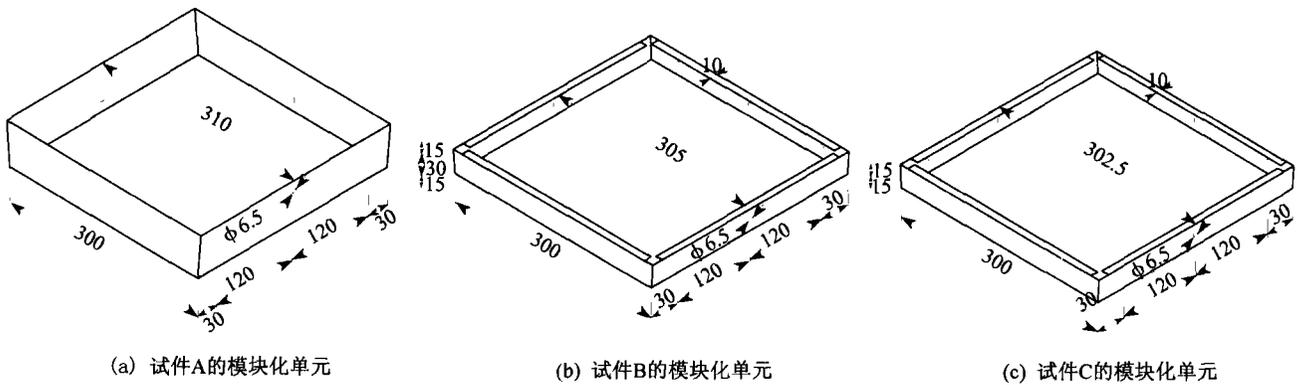


图4 钢底壳试验用模块化单元的尺寸

表2 钢板材料性能

试件	钢板厚度/mm	弹性模量 E_p /GPa	屈服强度或 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_u /MPa	极限应变 ϵ_u /%
试件 A	1.03	193.03	285	340	29.6
试件 B	1.03	197.13	276	348	30.1
试件 C	1.03	189.01	281	323	26.3

模块化单元是由名义厚度为 1mm 的镀锌钢板制作而成。表 2 列出了三个栓接钢底壳试件所用钢板材料性能，表中的数据是分别对每批钢板取四个拉伸试样进行测试所得试验结果的平均值。虽然将来实际应用时，模块化单元可大批量冲压成型，但本次试验研究所需的单元，都是在实验室通过裁剪、冲孔、弯折和焊接等步骤制作而成³。这是因为，试验所需单元数量较少，针对每一种单元而制造冲压模具无论在时间上还是成本上都不可行。

4.2 试验装置

如图 5 所示，钢底壳试件固定在一个由方形钢管组成的支架上。钢管上预先钻有小孔，可与钢底壳试件用螺栓连接，这样使以后有限元模拟时边界条件的定义相对简单，而支架也可以重复使用。针对钢底壳试件不同的矢高，分别设计并制造了两个不同的支架。有关支架的设计，可参考文献³。

在施工阶段，栓接钢底壳主要承受湿混凝土的重量。用现有的加载方式直接模拟作用在钢底壳上的均布荷载十分困难。虽然与实际的均布荷载相比，多点集中荷载

作用下试件的性能会有所差别,但考虑到该次试验的重点是为后续的有限元模型提供验证数据,这一差别并不重要。一旦建立了可靠的有限元模型,就可以通过数值模拟对这类壳体在均布荷载下的力学性能进行全面分析。为此,我们提出了一套基于滑轮组的多点同步加载系统(图5,文献[4])。采用该系统实现了对钢底壳试件的28点同步加载,其加载点的分布如图3所示。



图5 栓接钢底壳的试验装置

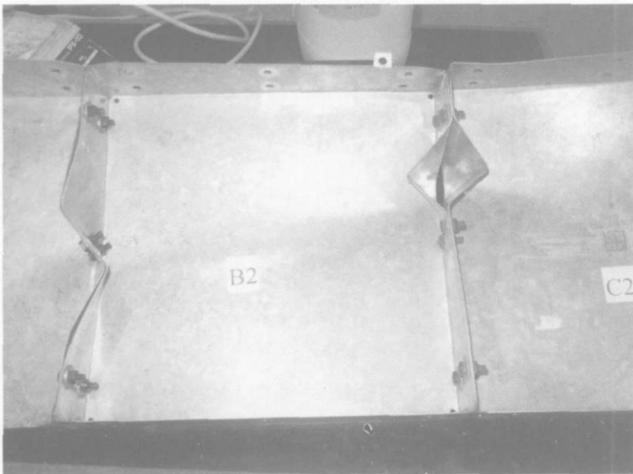


图6 试件A中薄壁加劲板两种不同的变形模式

量测系统主要由位移计和应变片组成。位移计的分布如图3所示,它们主要沿横向C行和纵向的第4列布置,量测单元件底板的竖向位移。另设其它位移计以监测支架支座在加载过程中的位移。应变片主要分布在单元件的底板,周边侧板和侧板卷边上。有关这些应变片的具体布置和它们的读数,详见文献[5]。

4.3 试验过程及结果

荷载通过上述的滑轮组系统同步施加于钢底壳试件。按加载阶段和试件的受力状态,每一步荷载的大小从0.4kN到1kN不等,荷载一直增加至试件破坏。在试

验初始阶段和试件即将屈曲时,每一步所施加的荷载会相对较小。以下给出这三个栓接钢底壳模型试验的主要结果,详见文献[5]。

4.3.1 试件A

当每个加载点的荷载达到1.0kN时,在薄壁加劲板上观察到微小侧向变形。这些侧向变形首先出现在横向加劲板上,然后才出现在纵向加劲板上,但两者出现的时间间隔并不明显。随着荷载的增大,这些侧向变形也不断地发展,成为明显的有着相似波长的屈曲短波形。当荷载达到极限荷载的80%左右,所有的薄壁加劲板上都能观察到十分明显的侧向变形。值得注意的是,两种不同的侧向变形模式同时出现在加劲板上:组成薄壁加劲板的两块侧板向着同一侧变形,也可分别向两侧变形(图6)。这种现象说明这两种屈曲模式对应的屈曲应力相近。每个加载点的荷载达到2.0kN时,钢底壳的刚度急剧下降。当荷载达到2.39kN时,试件A达到其极限状态而最终破坏。试件A破坏形式如图7所示,可以看出钢底壳发生了较大的整体变形。试件A钢底壳C3点的荷载位移曲线如图8所示,而钢底壳底板在荷载作用下沿横向和纵向的变形分布分别如图9所示。从位移器的读数可以看出,试验的初始阶段钢底壳试件沿着这两个方向的变形都是基本对称的。但随着荷载的增大,结构沿横向的变形越来越不对称,直到试件最后非对称破坏。



图7 试件A的破坏模式

4.3.2 试件B

与试件A不同的是,在试件B的整个加载过程中,基本上观察不到薄壁加劲板的侧向屈曲现象。这是因为侧板卷边在很大程度上增加了加劲板的局部稳定性。当荷载达到极限荷载的90%时,可以观察到个别单元体的底板出现局部屈曲。此后紧接着的就是试件的突然破坏,破坏时每加载点的荷载为2.34kN。试件B最后的破坏形式如

图 10 所示, 钢底壳只有半边发生较大的屈曲变形。应该指出的是, 试件 B 的薄壁加劲板高度只有试件 A 的一半, 但两个试件有着十分接近的破坏荷载。试件 B 侧板的卷边使得加劲板不易屈曲, 因此局部屈曲转而发生在底板上。虽然试件 A 和 B 最后都出现整体大变形破坏, 但在这两个模型试验中起支配作用的还是试件的局部屈曲。试件 B 在 C3 点的荷载位移曲线如图 8 所示, 而图 11 给出了试件 B 的底板在荷载作用下沿横向和纵向的变形特征。与试件 A 相类似, 试验开始阶段钢底壳试件沿着这两个方向的变形都是基本对称的, 但随着荷载的增大直到试件最后破坏, 结构沿横向的变形越来越不对称。应该指出的是, 试件 A 和 B 呈现出相似的初始刚度。

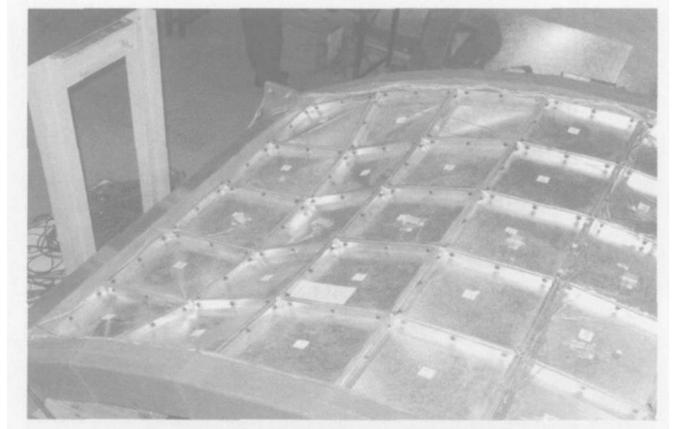


图 10 试件 B 的破坏模式

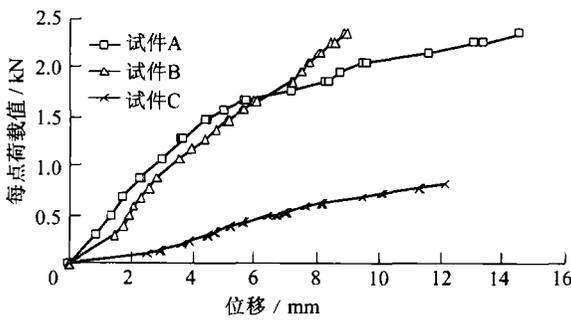
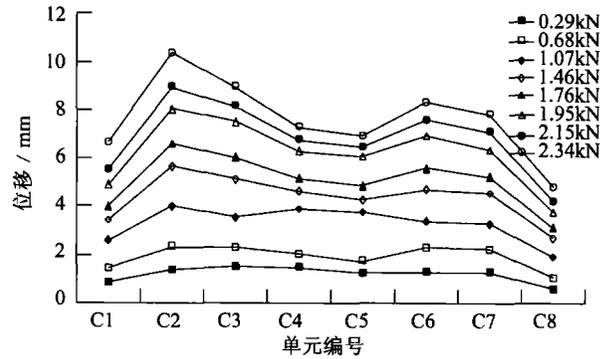
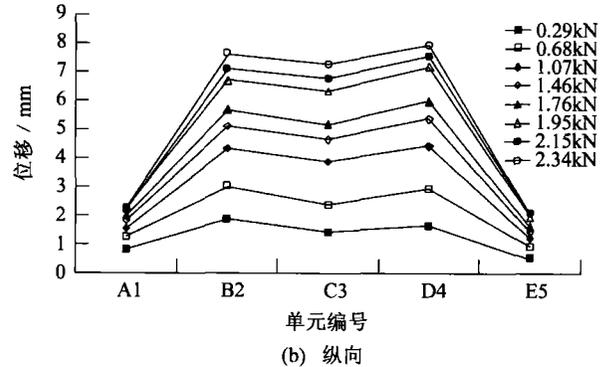


图 8 钢底壳在 C3 位置上的荷载位移曲线

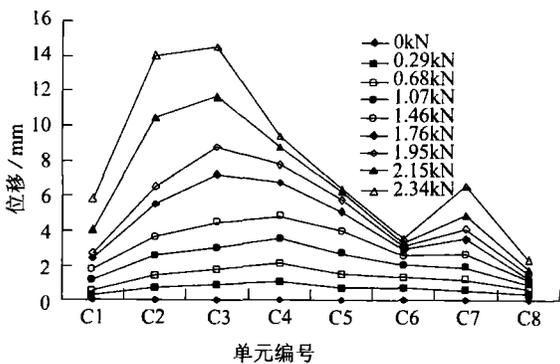


(a) 横向

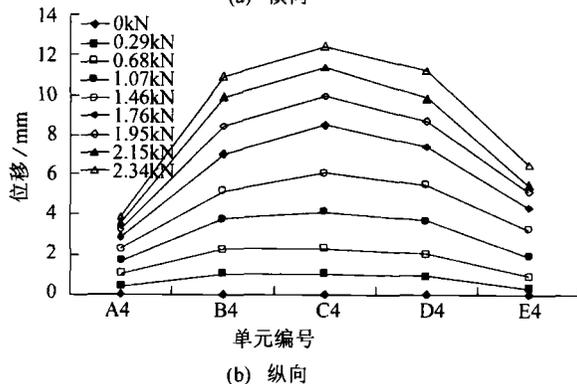


(b) 纵向

图 11 试件 B 的底板沿横向和纵向的变形图



(a) 横向



(b) 纵向

图 9 试件 A 的底板沿横向和纵向的变形图

4.3.3 试件 C

试件 C 的矢高只有试件 B 的一半。因此, 钢底壳试件的破坏形式跟预期的一样, 为整体屈曲。在整个加载过程中, 底板和薄壁加劲板都没有出现明显的局部屈曲, 试件在每个加载点荷载达到 0.82kN 时突然破坏。试件 C 的极限承载力只有其它两个试件的三分之一强, 其破坏形式如图 12 所示。试件 B 在 C3 点的荷载位移曲线如图 8 所示, 而图 13 分别给出了试件 C 的底板在荷载作用下沿横向和纵向的变形特征。与试件 A、B 不同的是钢底壳试件沿着这两个方向的变形在整个加载过程中都是基本对称的。

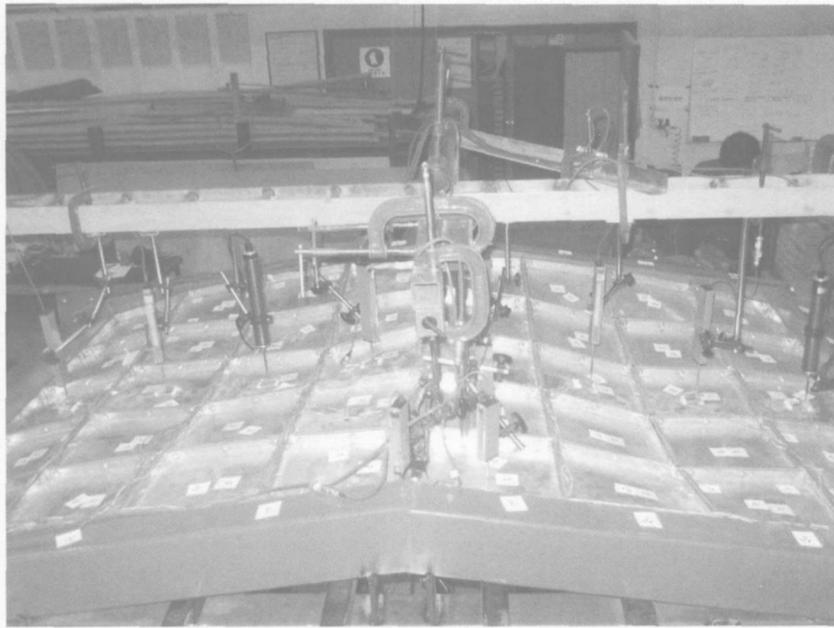
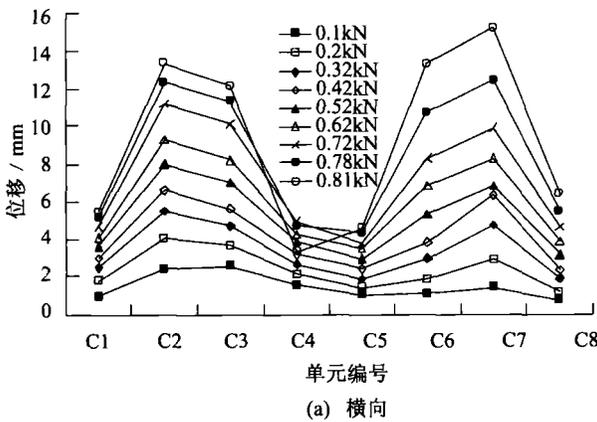
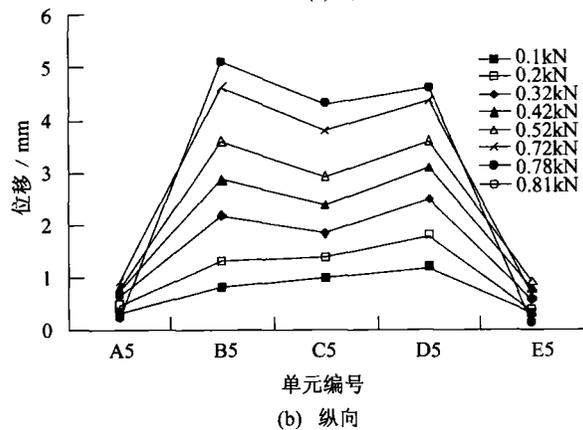


图 12 试件 C 的破坏模式



(a) 横向



(b) 纵向

图 13 试件 C 的底板沿横向和纵向的变形图

5 结语

本文介绍了一种大跨度钢 - 混凝土组合薄壳屋盖新型结构体系——Comshell 体系。该新体系的结构设计由施工阶段或使用阶段可能出现的几种破坏模式控制。通过对该结构体系施工阶段稳定性所进行的模型试验, 观

察到钢底壳在施工阶段的三种主要屈曲模式: 加劲板的局部屈曲、单元件底板的局部屈曲以及钢底壳的整体屈曲。试验也表明, 局部屈曲具有稳定的后屈曲路径, 但会导致较大的变形而影响钢底壳的整体屈曲荷载。本次试验也为建立钢底壳可靠的数值模型提供了宝贵的数据。
致谢: 感谢香港特别行政区研究资助局 (PolyU 5059/99E) 及香港理工大学对本项目的资助。

参考文献:

- [1] Medwadowski S.J. Concrete thin shell roofs at the turn of the millennium. Current and Emerging Technologies of Shell and Spatial Structures Proceedings of the IASS Symposium, Edited by J. Abel, R. Astudillo and N. K. Sivastava, 1998, 9 - 22
- [2] Teng J.G. Steel - concrete composite shells for enclosing large spaces. Proceedings, International Conference on Steel and Composite Structures Pusan, Korea 14 - 16 June 2001, 403 - 409.
- [3] Wong H. T. and Teng J. G. Experiment on a model steel base shell of the Comshell roof system. Proceedings, The Third International Conference on Advances in Steel Structures Hong Kong, China 9 - 12 December, 2002, 745 - 754.
- [4] Wong H. T., Teng J. G. and Wang Z. C. A pulley - based system for the simulation of distributed loading on shell roof structures. Experimental Techniques 27(5), 2003, 21 - 27.
- [5] Wong, H. T., Behaviour of Steel - Concrete Composite Shell Roofs, PhD Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, 2005.