

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.022

# 峡谷河流地形的空间四索面双幅曲线形斜拉桥设计

徐金法, 杨飞

(江苏交通工程咨询监理有限公司, 江苏 南京 211800)

**摘要:**该文在林同炎先生原有 Ruck 桥设计基础上,改进单幅曲线形斜拉桥为椭圆环状双幅曲线形斜拉桥,设置鸭蛋拱形桥塔,布置四索面空间斜拉索网,形成峡谷河流地形的空间四索面双幅曲线形斜拉桥,可改善曲线形斜拉桥的结构受力性能,完善交通功能,提升景观效果。结合 400 m 跨径的 New Ruck 斜拉桥,进行工程参数设计,建立 Midas 有限元分析模型,开展动力模态分析研究,验证空间四索面双幅曲线形斜拉桥新桥形的结构优越性。

**关键词:**鸭蛋拱形桥塔;空间四索面斜拉桥;双幅曲线形斜拉桥;景观桥梁

## 1 引言

在峡谷河流地形条件下,山区公路通常是沿着河岸设计,如果跨河桥梁采用曲线形斜拉桥结构,则可为山区道路选线创造十分有利的条件,带来极为合理又经济的结果。

早在 1977 年,林同炎先生就提出过曲线形斜拉桥的设计方案(如图 1 所示),Ruck 桥将空间拉索按照空间曲面的布置规律锚固在两边山坡上,利用两边山体优良的地质条件充当强大的地锚结构,以此来平衡桥梁的荷载,4 个空间索面的拉力索代替了桥梁墩台,承担整个桥梁的荷载,Ruck 桥选用曲线形斜拉桥桥形避免了大量的开凿石方或修建隧道,因而可节省数百万美元,曲线形斜拉桥结构本身与环境配合相得益彰,造型美丽。

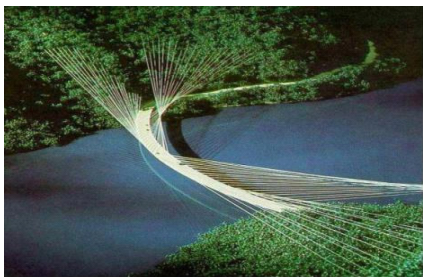


图 1 林同炎的 Ruck 桥设计方案

Ruck 桥至今没有修建成功,其主要原因是 Ruck 桥采用曲线形主梁与斜拉桥组合,结构复杂,曲线主梁

要同时承受弯矩、剪力和扭矩的复合作用,其缆索设计计算分析困难,施工阶段的内力平衡控制难度很大;Ruck 桥斜拉缆索分散锚固于山坡上,施工复杂,后期维护相当困难;由于水平向的曲线拱作用效应,使得基础结构受力不平衡。

针对峡谷河流地形的山区公路大跨径跨河曲线形斜拉桥,借鉴四索面双幅斜拉桥的设计理念,改进 Ruck 桥单幅主梁曲线形斜拉桥为椭圆环状双幅曲线形主梁斜拉桥,设置鸭蛋拱形桥塔,布置四索面空间斜拉索网,形成一种峡谷河流地形的空间四索面双幅曲线形斜拉桥,改善结构受力性能,完善交通功能,提升景观效果。

该文针对原 400 m 跨径 Ruck 桥设计的改进要求,开展峡谷河流地形的 New Ruck Bridge 空间四索面双幅曲线形斜拉桥的构形研究,进行工程参数设计,建立 Midas 有限元分析模型,验证新型空间四索面双幅曲线形斜拉桥结构的优越性。

## 2 构形研究

New Ruck Bridge 桥位于距加利福尼亚 10 英里(16.09 km)的奥本坝水库上,河面宽度约为 400 m,Ruck 桥两岸均系石质的高山,山势陡峻,树林密布,两岸公路均与河流平行,河流水深约 80 m,水流湍急,不宜修筑桥墩;又因原有山区公路是沿河傍山而筑,修建直线桥梁,则两岸公路必须改线,将需要开凿大量的石方工程或修筑隧道,投资巨大。

收稿日期:2021-03-20

作者简介:徐金法,男,硕士,高级工程师,E-mail:520160863@qq.com

New Ruck Bridge 桥设计借鉴四索面双幅斜拉桥的设计理念,原 Ruck 桥单幅曲线形斜拉桥改进为椭圆环状双幅曲线形主梁,设置鸭蛋拱形桥塔,布置四索面空间斜拉索网,形成双幅环形曲线斜拉桥,完善交通功能,提升景观效果。

相比于原有 Ruck 桥单幅曲线主梁,New Ruck Bridge 桥采用左右结构对称性的椭圆环状双弯主梁,可以大幅度减少主梁中的扭矩,左右两幅对称的曲线形主梁的水平向内力自平衡,可使悬臂施工方法确实可行,施工安全简便。

蛋形曲线是数学上的一个重要的几何曲线,蛋曲线是匀称光滑的曲线,其数学方程如下:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(ky+b)^2} = 1 \quad |k| \leq 1 \quad (1)$$

式中: $x$ 、 $y$  为坐标轴尺寸; $a$  为蛋宽度参数; $b$  为蛋高度参数; $k$  为蛋形状参数。

New Ruck Bridge 桥采用鸭蛋拱形桥塔,依据蛋形曲线方程,火工煨弯加工钢管节段,施工现场焊接拼装成形,形成蛋曲线形钢管拱肋,吊装蛋曲线形钢管拱肋就位,在钢管内灌注高强混凝土,形成钢管混凝土蛋曲线拱形桥塔(图 2)。

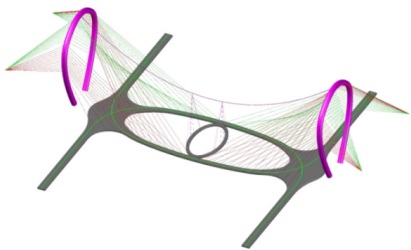


图 2 New Ruck Bridge 设计方案

鸭蛋拱形桥塔设置在两岸山坡之上,在鸭蛋拱桥塔的塔顶安装空间斜拉索网和斜拉背索网,采用悬臂施工方法安装桥面加劲梁,直到桥面合龙,形成一种钢管混凝土蛋曲线拱形桥塔的空间四索面双幅曲线形斜拉桥。

相比于尖尖塔顶的钢管混凝土抛物线拱形桥塔,钢管混凝土蛋曲线拱形桥塔拱脚两腿收拢,减少了基础尺寸,顶部宽阔,空间斜拉索发散布置,景观效果更佳,布置空间缆索更加方便。

鸭蛋拱形桥塔受力性能优良,造形优美,具有良好的视觉效果和优美的外形曲线,在山坡上,设置鸭蛋拱形桥塔,锚固四索面的双曲面空间斜拉索网,构形漂亮,与周围的山峰和峡谷环境融合非常和谐。

鸭蛋状拱形桥塔锚固四索面空间缆索,双幅四索

面空间曲面缆索紧紧地拉住了椭圆环状双弯曲线形主梁,形成双曲面空间索网,结构简明,立面丰富,造形美丽;椭圆环状双弯主梁、鸭蛋状拱形桥塔和四索面空间缆索三者均为曲线形结构形体,三者曲线构件搭配巧妙协调,婀娜多姿,使得斜拉桥呈现出特殊的曲线美,相得益彰,四索面空间缆索造型新颖独特,是结构学和建筑学的理想结合。

四索面空间斜拉索网由内侧拉索网和外侧拉索网组成,内侧拉索网锚固于鸭蛋拱形桥塔结构的曲线反弯点以上的塔顶区段,外侧拉索网锚固于鸭蛋拱形桥塔结构的曲线反弯点以下区段的顶部位置,鸭蛋拱形桥塔依次划分为 4 个锚固区段,鸭蛋拱形桥塔的第 1、3 区段锚固左曲线梁的两个空间斜拉索面,鸭蛋拱形桥塔的第 2、4 区段锚固右曲线梁的两个空间斜拉索面,两个内侧拉索网采用交叉锚固方式斜拉拽紧左右曲线梁的内侧,两个外侧拉索网呈现八字形状斜拉拽紧左右曲线梁的外侧,四组空间缆索网平稳吊紧椭圆环状双弯曲线形主梁,空间曲面四索面斜拉网优化布置,斜拉缆索角度布置合理,可确保桥面净空要求,四个索面构成空间曲面网缆索体系,造形美观,桥景交融,美不胜收。成桥效果图如图 3 所示。



图 3 New Ruck Bridge 成桥效果图

单主缆索悬挂在两个鸭蛋拱形桥塔塔顶之间,在施工阶段,在左右幅椭圆环状双弯曲线形主梁之间设置若干道临时钢桁架连系梁,单主缆索设置悬吊缆索紧紧吊住钢桁架连系梁,确保椭圆环状双弯曲线形主梁节段斜拉悬臂拼装过程中结构受力平稳,施工中可以避免出现椭圆环状双弯主梁结构吊装扭转现象,通过缆索吊装方法辅助悬臂拼装施工,直至悬臂拼装合龙成桥。

在成桥后,单主缆悬索在中央处设置若干放射状斜向吊索,承受中央椭圆形环梁的重量,确保中央椭圆形环梁受力安全可靠,中央圆环梁作为撑杆构件,限制椭圆环状双弯主梁的侧向变形,增加了桥面结构的整体性,同时,中央椭圆形环梁兼作观光平台。

### 3 施工步骤

New Ruck Bridge 空间四索面双幅曲线形斜拉桥的施工方法,包括以下步骤:

第一步:在峡谷河流两岸,进行双幅曲线形斜拉桥的桥址选择,并在山坡体上,开挖基坑,施工斜拉桥隧道式锚碇和桥塔基础。

第二步:依据蛋形曲线方程,采用火工煨弯制作工艺,弯曲钢管节段,运输到施工现场,焊接拼装成型,吊装蛋曲线钢管拱肋就位,蛋曲线钢管拱肋的钢管内灌注高强混凝土,形成钢管混凝土蛋曲线拱形桥塔。

第三步:在鸭蛋拱形桥塔之上,分散安装斜向背拉索网,斜向背拉索网分为左右两股,集中锚固于锚碇之中,并在两个鸭蛋拱形桥塔的塔顶之间悬挂单主缆悬索。

第四步:采用斜拉桥悬臂拼装施工方法,悬臂拼装椭圆环状的双幅曲线形主梁节段。

第五步:在椭圆环状双幅曲线形主梁节段悬臂拼装施工过程中,在左右两幅圆弧形桥面段之间,设置多道临时连系梁结构,利用单主缆悬索设置临时吊索,吊紧临时连系梁结构,缆索吊装施工方法辅助悬臂拼装双弯斜拉桥的左右两幅椭圆弧形桥面段,直到桥面拼装合龙,悬臂拼装施工如图 4 所示。

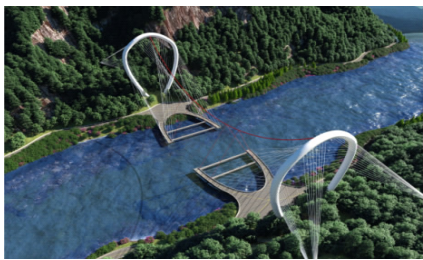


图 4 New Ruck Bridge 悬臂施工

第六步:利用单主缆悬索,在中央处,安装放射状的吊索,悬吊安装椭圆形环梁,椭圆形环梁支撑顶紧椭圆环状双幅曲线形主梁的左右两幅椭圆弧形桥面段的内侧桥面,椭圆形环梁兼作观光平台。

第七步:安装栏杆和路灯,摊铺沥青混凝土路面,修建峡谷河流地形的 New Ruck Bridge 超大跨径双弯曲线形斜拉桥。

### 4 设计参数

New Ruck Bridge 桥采用峡谷河流地形的空间四

索面双幅曲线形斜拉桥的新桥型,设计总图如图 5 所示,设计荷载为公路一 II 级,河流宽度为 400 m。

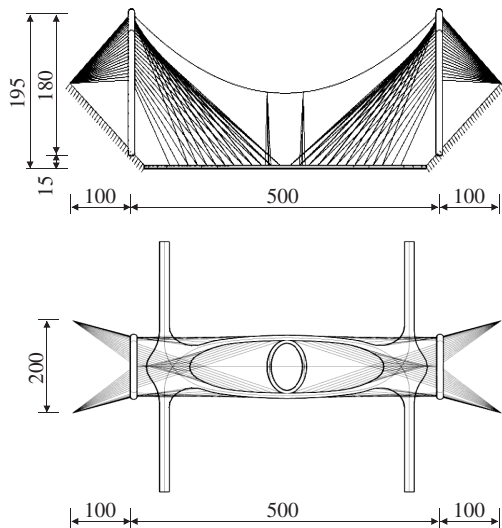


图 5 New Ruck Bridge 设计总图(单位:m)

在两岸山坡上,修建鸭蛋拱形桥塔,两个鸭蛋拱形桥塔之间距离为 500 m,鸭蛋拱形桥塔高度为 170 m,桥塔最宽处为 130 m,鸭蛋拱形桥塔采用直径为 10 m 圆形钢管,钢管壁厚 40 mm,内灌注 C60 混凝土。

椭圆环状双幅曲线形主梁由椭圆弧形桥面段、连接过渡桥面段和弧形悬挑板组成,椭圆弧形桥面段为单箱双室的波形钢腹板曲线形组合箱梁,梁高 3 m,双幅桥面宽度均为 10 m。

连接过渡桥面段采用钢筋混凝土厚板结构,板厚为 3 m;尾部的弧形悬挑板为 0.5 m 厚的钢筋混凝土板,弧形悬挑板采用嵌入式顶紧山坡体。

椭圆环状双幅曲线形主梁中央设置椭圆形环梁,椭圆形环梁支撑椭圆环状双幅曲线形主梁的左右两幅椭圆弧形桥面段的内侧桥面,椭圆形环梁兼作观光平台,椭圆形环梁为普通钢箱梁结构形式,椭圆形环梁梁高 2.5 m,宽 4 m。

四索面空间斜拉索分为 4 个区域锚固于鸭蛋拱形桥塔上,四索面空间斜拉索网由内侧拉索网和外侧拉索网组成,内侧拉索网锚固于鸭蛋拱形桥塔曲线反弯点以上的塔顶区段,外侧拉索网锚固于鸭蛋拱形桥塔曲线反弯点以下区段的顶部,其中内侧拉索网采用交叉锚固方式。四索面空间斜拉索网缆索采用强度为 2 000 MPa 的成品钢丝索,桥面锚固点间距为 15 m,从梁端部到跨中位置斜拉索直径由 0.15~0.20 m 线性变化,斜向背拉索网一端分散锚固于鸭蛋拱形桥塔之上,另外一端分为左右两股集中锚固于锚碇之中。

单主缆悬索设置在两个鸭蛋拱形桥塔之间,单主缆悬索直径为0.4 m 高强钢丝成品缆索。

成桥后,拆除临时连系梁,单主缆悬索设置放射状吊索,吊索共计12根高强钢丝缆索,每一根缆索直径为0.05 m,悬吊中央处椭圆形环梁。

该设计采用Midas软件建模并计算,空间斜拉缆索和单主缆悬索采用索单元,蛋曲线桥塔和桥面箱梁采用梁单元,New Ruck Bridge桥的Midas有限元模型如图6所示。

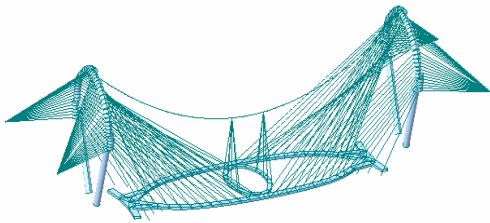


图6 Midas有限元模型

## 5 竖向荷载作用下的计算结果

主跨桥面做满荷加载,桥面附加恒荷载采用均布荷载标准值 $5 \text{ kN/m}^2$ ,桥面活荷载采用公路II级荷载标准值,模型中对直接受荷载的加劲梁作内力分析。计算结果如图7所示。

最大竖向位移出现在跨中位置,最大位移为0.280 m,满足规范规定1/500限值要求。

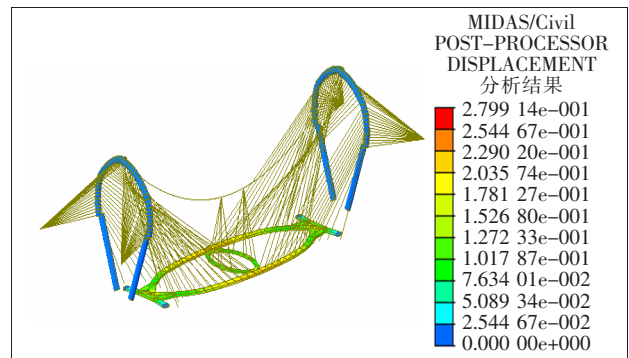
单主缆悬索内力为80 019 kN,应力为407 MPa;斜拉索最大内力为18 758 kN,斜拉索最大应力为933.0 MPa,缆索应力合理。分析表明:竖向荷载作用下,New Ruck Bridge桥结构受力合理。

## 6 动力模态分析

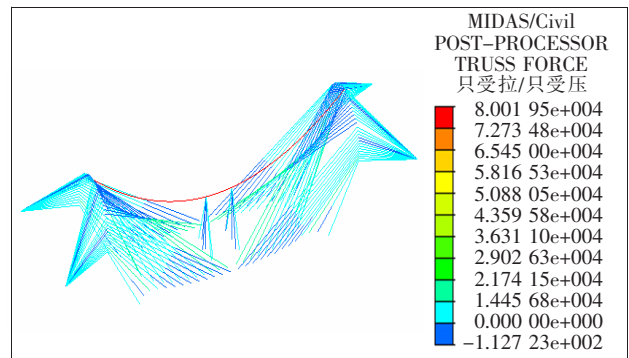
基于Midas的非线性静力分析和模态分析功能,进行动力模态分析。为了不遗漏任何振型,分析过程中采用子分块法求解特征方程。得到桥梁前几阶振型如图8所示。

由图8的计算结果可知:第1阶振型为正对称侧弯,频率为0.740 Hz,较高;第2阶振型为正对称竖弯,频率为0.790 Hz,相比相同跨径的其他斜拉桥结构其频率数值相对较大,表明New Ruck Bridge桥结构具有较大竖向刚度和侧向刚度。

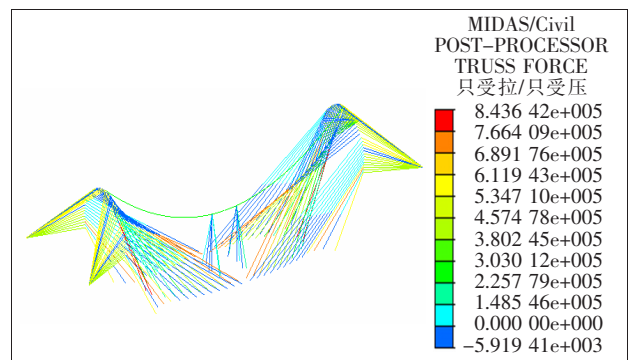
整体来看,振型密集,出现明显的振型分组现象,前10阶振型主要以侧弯、竖弯振动为主,直到第10阶



(a) 挠度(单位:m)



(b) 索单元内力(单位:kN)



(c) 索单元应力(单位:kPa)

图7 竖向荷载作用下的计算结果(恒+活)

才出现正对称扭转振型,正对称扭转频率为1.358 Hz,较高,表明结构具有良好的抗扭刚度,结构空间整体性强,扭转频率比值为1.84,较高,表明结构的抗风稳定性较好。

## 7 结论

(1) 将原Ruck桥单幅主梁曲线形斜拉桥改进为椭圆环状双幅曲线形主梁斜拉桥,设置鸭蛋拱形桥塔,布置四索面空间斜拉索网,四索面空间曲面缆索紧紧地拉住了椭圆环状双幅弯曲线形主梁,形成峡谷河流

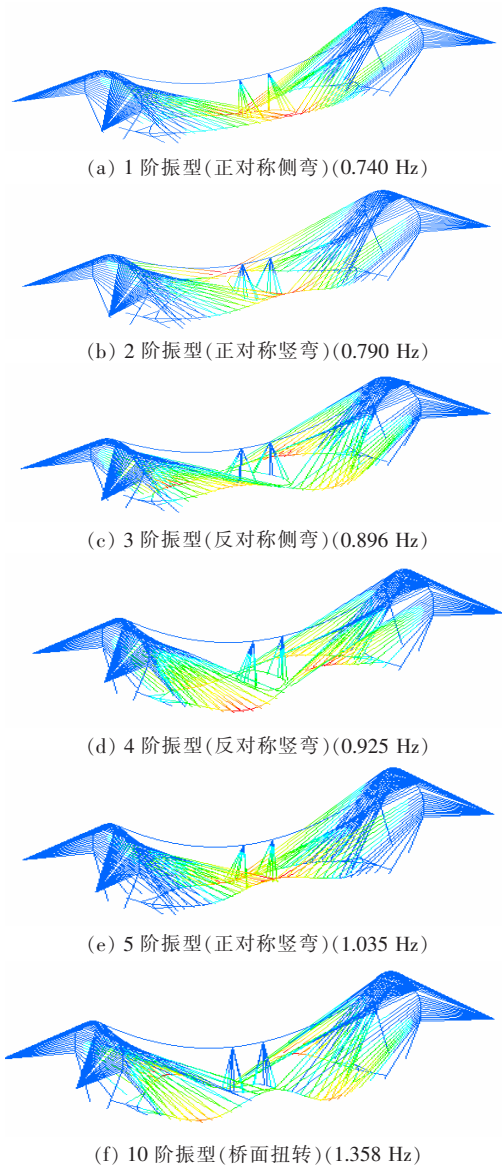


图 8 典型振型

地形的空间四索面双幅曲线形斜拉桥, New Ruck Bridge 桥大幅度改善了曲梁形斜拉桥的结构受力性能, 完善了交通功能, 提升了景观效果, 施工方便, 造型优美。

(2) New Ruck Bridge 桥的椭圆环状双弯主梁、鸭蛋状拱形桥塔和四索面空间曲面缆索网三者均为曲线形结构形体, 结构简明, 四索面空间缆索造型新颖独特, 是结构学和建筑学的理想结合。

(3) 在竖向恒活荷载作用下, 最大竖向位移出现

在跨中位置, 最大位移为 0.280 m, 满足  $l/500$  规范要求。分析表明: 缆索应力合理, 椭圆环状双幅弯曲线形主梁的扭矩较小, 因此, New Ruck Bridge 桥设计合理。

(4) 前 10 阶振型主要以侧弯、竖弯振动为主, 基频较高, 表明 New Ruck Bridge 桥结构竖向和侧向刚度较大; 直到第 10 阶才出现正对称扭转振型, 正对称扭转频率为 1.358 Hz, 较高, 扭弯频率比值为 1.84, 较高, 表明 New Ruck Bridge 桥结构空间整体性强, 其结构抗风稳定性较好。

#### 参考文献:

- [1] 叶成银, 庞彪. 刚果(布)滨河大道斜拉桥主桥设计[J]. 中外公路, 2019(4).
- [2] HUNG, G. M., & STUCCHI, F. R. Conception of Cable-Stayed Curved Deck: The Effects of Unilateral Suspension/Concepção de Tabuleiros Curvos e Estaiados: os Efeitos da Suspensão Unilateral[J]. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2018, 11(4): 686-695.
- [3] 黄邦本. 美国 Ruck-A-Chuky 弯斜张桥设计简介[J]. 国外公路, 1980(1).
- [4] Galante Bardín, D., & Astiz Suárez, M. L. A. (n. d.). Design of a Curved Cable-Stayed Bridge Deck's Directives, by the Funicular and Antifunicular Curves of the Concentric Load Introduced by the Cables[J]. Informes de La Construcción, 2017, 69(548): 1-14.
- [5] 肖海珠, 张强, 高宗余. 北京地铁五号线曲线斜拉桥设计[J]. 桥梁建设, 2006(4).
- [6] Raftoyiannis, I. G., & Michaltsos, G. T. (n. d.). Curved-in-Plane Cable-Stayed Bridges: A Mathematical Model[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2012, 12(3).
- [7] 殷旭东, 司选舟. 曲线斜拉桥模型设计与试验[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(10).
- [8] 张二华, 单德山, 周泳涛. 曲线斜拉桥主梁扭矩分布优化及试验验证[J]. 桥梁建设, 2018(1).
- [9] Hoffman, J. J. Analytical and Field Investigation of Horizontally Curved Girder Bridges[D]. Iowa State University, 2013.
- [10] Lin, W., & Yoda, T. Analysis, Design and Construction of Curved Composite Girder Bridges: State-of-the-Art[J]. International Journal of Steel Structures, 2010, 10(3), 207.