

模态分析

徐珂/一直模模糊糊的理解

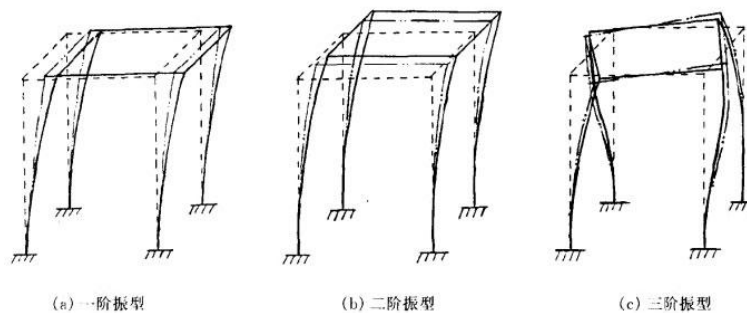
20161007

纯粹说写博客，我大概在十几年前开始的，初期并不是以结构设计为主，想起什么就写什么，范围比较杂包括电影、心里学、运动、旅游、计算机等等，偶尔也写过结构，没觉得结构有什么好写的，多半是随心所欲地写。当时是在公共网站上写，后来发现一个问题，就是不断有博客网站关闭，辛辛苦苦写的东西忽然某天就不存在，早期写的杂文基本都是这样丢失的，而预先转场也很麻烦，很多网站间不兼容，于是就琢磨自己建个网站长期保留自己写的东西，就有我的个人网站。我还记得十年前8月份那个下午，跟几个朋友去踢了一场足球，坐出租车回家的路上，忽然觉得网站还是应该以自己的专业为主比较好，很多专业问题值得自己去琢磨，为什么不写呢？其它的东西虽然很有意思，但是随意性很大，于是我就跟早期的“道理小宁”说拜拜，正式用自己的名字开始写结构博客。

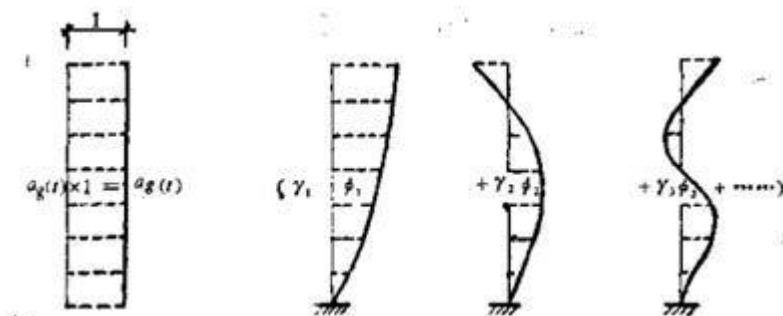
我写结构博客很大一个目的是记录工作中的疑问，很多疑问并不是随着设计结束就已经解决。事实上无论多大多小的项目，所谓的设计都是几个设计人和审查人的决定结果，复杂的项目由稍微多的人决定而已，做出来的产品就没有问题？肯定不是的，所以我会尽可能把自己在设计中想到问题记录下来，促使自己有时间再思考一下。

关于模态分析，在我的设计历程中一直是一个很模糊的概念，在学校学习的时候，因为学习能力的问题，在我的脑海里没有模态或振型这些概念。毕业后大

概一两年才很模糊地明白结构设计是做什么的，最开始记住一个事情，结构布置方正是利于结构安全的。后来在设计中不断用到振型，但是用久以后，似乎只有第一平动振型、第二平动振型、第三扭转振型以及扭转比的概念，直到有一次听清华方鄂华先生讲课，她大概提到一个设计合理的方正结构，振型和位移表现在一般情况下表现良好，但是设计不合理的结构，振型和位移往往表现不好，这让我觉得很有意思，忽然对振型有点新鲜的感觉，我们也知道振型是结构的固有特性，但是它代表什么意思？



如果从教科书和规范的角度似乎可以知道，振型与地震响应有关，直接影响地震力大小，振型频率与周期对应，结构工程师知道振动周期，按照计算公式就可以针对设防烈度换算地震力，然后依据各种要求进行抗震设计，这样不就可以了吗？因为振型不像刚度概念可以用变形情况进行表现，那么怎么理解振型，或者说振型的意义是什么，我一直没有确切的解释，或者说能够通俗的解释一下。



严格意义的讲，现在研究生课程里有动力学或振动学，会详细讲解模态问题，一般都是学术性讲解，比如“模态是结构的固有特性，每一个模态具有特定的固

有频率、阻尼比和模态振型，模态分析是根据结构的固有特性的动力属性去描述结构性能。”怎么样，看完这个解释是否理解？不管理解与否，需要明白一个事情，就是模态分析结果的振型云图中模态（位移）矢量是个相对值，它不代表实际的物理位移，只是反映不同质量点在模态中的变形比例关系。也就是说当一个结构形式确定后，通过模态分析可以知道结构的特性，可以了解各个质量点在某一模态下的振动响应参与比例，其正式的说法是模态分析是计算结构振动特征方程的特征值和特征向量。

写博客写到今天我更喜欢用通俗的语言来解释一些东西，所以很长时间在琢磨怎么解释振型到底有什么用。最近一段时间在做一个遗址保护项目，有一部分是连续做 20 米单跨上人屋面，建筑层高 12 米，考虑平面长度问题，分成四个结构单体，平面尺寸都是一样的，因为地坪标高变化，四个单体的结构平均计算层高实际在 11.00~14.00 米之间变化，而且每一单体的各柱长度也是随地坪变化，采用相同构件截面和相同荷载情况下，四个结构单体的第一平动周期分别在 0.65S、0.73S、0.82S、0.91S，第二平动周期与第一平动周期比大概都在 0.94~0.96，第三扭转周期与第一平动周期比大概都在 0.73~0.77，总体看振型表现相似度很高，看到这个结果，我忽然觉得振型是不是可以这样理解，它就像医学上对人的体质进行综合评估，模态分析可以帮助结构工程师在数据上评估结构的强壮性，比如上面的例子，如果将上面四个单体看做四个方案，由结构专业来确定层高，最终设计只能选择其中一个方案，结构工程师应该选择哪个？

接着再以医学的角度来看，我们每个人出生的时候似乎都是健康的小宝贝，都有一个脑袋两双手两只脚组成大写的人，似乎没有什么区别，但是经过医学检查后，就会发现在体质上每个人有很大区别，这个人心脏不好，那个人肺部不好，

另一些人是消化系统较弱等等,在遇到同样的外界刺激情况时,有的人就会病倒,而其他人不会受到什么影响,像春秋时节肺部弱的人容易受天气变化影响而感冒,夏季食物新鲜问题会让消化系统薄弱的人容易产生腹泻,在了解这些情况后,医生就会根据每个人的体质给出健康建议,有针对性进行健康医疗。那么结构模态分析就是让结构工程师了解设计作品健康程度的工具,在概念上判断结构体是否能适应未来建成使用要求,当然这种检测还包括刚度、内力等表现。再举个例子来说明这个问题,现在要设计一个框架,第一个方案用 600X600 的柱截面,用 300X800 的梁截面,第二个方案用 650X650 的柱截面,用 350X750 的梁截面,第三个方案用 700X600 的柱截面,用 400X700 的梁截面,由于存在截面差异,就会有优劣选择的问题,单纯从截面数据上看是很难选择的,有模态分析后,这三个方案有不同的模态响应,结构工程师就可以在本质上来判断三个方案差异,进行最终的选择。这里要说一下第一模态可以理解为结构体系最脆弱体质表现,当地震激励情况下,最容易出现破坏表现,所以结构分析很重视第一模态的表现。而扭转模态会引起剪切效应,对结构构件其它承载能力产生不利影响因此要避免扭转模态与第一平动模态粘连,这点就像复合病症,远比病人只得一种病难治。

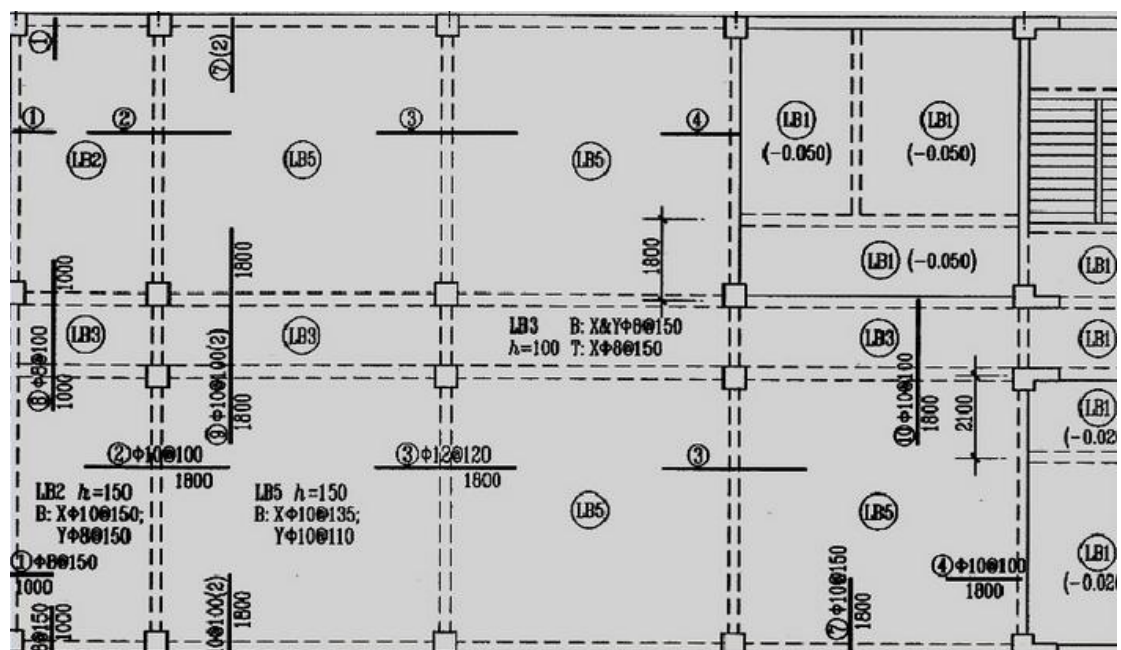
如果从医学角度看着晕的话,我再换成管理学的角度去解释一下,一个单位只有一个人的时候,这就相当于单质点结构,这个单位想要做什么事情很简单,这一个人的行为就代表这个单位的行为,一切都好解决。当这个单位由 100 个人组成时,这就相当于 100 个质点结构,如果没有统一行动方针,这 100 个人的行为就是随机行为,难以形成团队力量,模态分析就是给结构工程师提供结构体系管理分析工具,究竟是一盘散沙还是行动一致,在方案阶段通过振型表现,宏观上不断不断调整结构布置就相当于调整统一行动管理方案,使结构体系达到理

想的状态,在理论上一定会有一个最优方案存在。

因此模态分析的技术作用可归结为一下几个方面：

- 1) 评价结构体系的振动特性（我称之为强壮性评估，比如扭转第一振型意味着什么？）；
- 2) 根据结构振动特性表现进行设计合理性评估（我称之为细节性评估，比如前述三个框架方案对比。）；
- 3) 预估结构体系的薄弱点进行结构优化设计（我觉得这才是结构优化的本质，比如管理学解释。）；
- 4) 评估结构体系的载荷冗余量（这个我暂时还没理清楚,以后再说）。

后面是今年做一个项目遇到的事情,是我的同事帮其他部门做一个多层混凝土框架,按照我们的想法,大概两三个星期就应该完事,把图交了以后,出问题了,我们的画图方式不满足他们的要求,比如楼板必须按照平法编号方式绘制,就像下面这张图。



我从来不这样画楼板，不会为楼板编号，也不会为钢筋编号，我做过的工程没有哪个钢筋工投诉我没按照平法画楼板，事实上对于特殊性的配筋我经常问他们是否理解。我的同事做的这个项目因为布置原因，一层有近三十个板号，钢筋编号严格去编的话也有很多，结果本来一天可以完成楼板设计，后来花了两天多时间在编号，然后他问我怎么看这个事情，我说什么事情都有好的一面，也有不好的一面，但是你不会记住那些让你痛苦却不会让你成长的事情！

后来同事把其它绘图要求都改完的时候，我又补充一个看法：他们这样做，也许更体现结构工程师的价值！

经验是生活的肥料，有什么样的经验便变成什么样的人，在沙漠里养不出牡丹来。

——老舍《骆驼祥子》