



高層建筑的振動

苏联И. Л. 卡尔欽斯基

86.217

KEQS

基本建設出版社

高層建筑的振動



基本建設出版社

1957·北京

內 容 提 要

本書为苏联工業建筑中央科学研究院 (ЦНИПС) 和苏联建筑工程部技术司联合举办的科学报告之一。

本書叙述高層建筑物振动問題的实地研究和它的結果, 研究这些建筑物中鋼架的填充砌体对于側向剛度的影响, 並用近似算法求出自振频率的公式的結論。

本書可供設計工程师、研究生和科学工作者参考。

原 本 說 明

書 名: КОЛЕБАНИЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

出版者: Государственное издательство

литературы по строительству и архитектуре

出版地点及日期: Москва—1953

高 層 建 筑 的 振 动

关 振 鐸 譯

*

基 本 建 設 出 版 社 出 版

(北京復興門外三里河)

北京書刊出版業營業許可證出字第086號

国家建設委员会印刷厂印刷 新华書店發行

*

書号: 15052.162

開本787×1092 1/32·印張17/16 字數30,000

1957年10月第1版

1957年10月第1次印刷·印數1—1,200冊

定价(11) 0.32元

目 录

緒 論	1
1. 实地观察方法	3
2. 主要的实地試驗結果	17
3. 剪切振動	22
4. 側向剛度	32
5. 剪切模量	39
結 論	40
参考書籍	41

緒 論

高層建築物的建造提出了一系列與這些建築物的設計及計算有關的新問題。其中包括非常重要的高層建築物的側向剛度的問題。目前的研究工作是在研究這類結構物的振動，其目的是求它的側向剛度。

在設計高層建築物時，除去計算它的永久垂直荷載及暫時垂直荷載以外，還要驗算在風力作用下的情形。全部風荷載通常被假定為僅由建築物的剛架來承受。但在剛架之間還有建築物的牆及隔牆，它們毫無疑問應提高結構物的剛度，因之，風荷載不僅由剛架承受，填充結構也應承受一部份。荷載在這些構件間的分佈情況，正像任何一種靜力不定體系一樣，應該按照它們的剛度來進行。

這樣一來，建築物的剛架及其填充砌體的側向剛度的大小，可以由風荷載在結構物這兩種構件之間的分佈情況來判斷。剛架所承受荷載的實際比重，從數量上說明了在設計新的相仿的結構物時，可以用來降低由剛架所擔負的風壓的計算數值。因此導致了建築的重量減低及造價降低。

與此有關，發生了結構物側向剛度的實際大小的問題。

高層建築物在水平力作用下計算簡圖的不明顯性，自然會引起必需來進行試驗研究。可是進行試驗需要創設試驗用水平荷載，但事實上應該考慮到由於結構物尺寸很大，為此目的，所需要的荷載是不可能作到的。進行試驗研究時，高層建築物側向剛度的唯一指標，是它的振動頻率，可以在實際結構上量

得。

还有在結構物上作用有其他动力因素时，也有必要进行高層建筑的振动研究。其中包括，具有很大实际意义的动力因素是由于基础的移动。

基础的移动可能是因为土壤由于地震而引起振动的結果，还可能因为巨型工業設備开动的結果。在这种情况下，設計者將被迫决定建筑物的自振頻率，同样要求选用那一种計算簡圖。

这种結構物的工作情况，例如現代高層建築物，是空間作用的，而且是多次靜不定結構，是非常复杂的，目前未必能够在很复杂的計算簡圖中完全充分地表达出来。即使这样的簡圖会建立起来了，它的計算也是異常复杂的，因此沒有实际意义。

反之，採用極為簡化的計算簡圖，只考虑其中某一最重要的因素，实际上是非常有用的，因为計算應該是簡單的，因此它很适用于实际問題上。但是所採用的簡化方法不應該达到这样的限度，即它引起与現象的實質有所不合，帶來粗俗的性質而不是簡化。

为了合理地選擇高層建築物的計算簡圖，看来最正确的还是应坚持早先研究居住磚石建築物的振动問題〔2〕时所採用过的方針。这个方針是用試驗方法来决定振动着的建築物的变形形狀；在分析它特性的基础上，採用建築物受水平力的作用是基本的佔統治地位的因素作为前提。

§ 1. 实地观察方法

在莫斯科的三座高层建筑上进行了试验检查，它们是斯摩棱斯克广场(Смоленская площадь)大厦、莫斯科大学(МГУ)及柯切尼切斯阔(Котельническая)河岸大厦(见图1—3)。检查的目的是求得建筑物自由振动时的变形形状，以及确定与此相对应的频率。由于振动的不稳定，必须同时进行不少于两点的测量。在整个观察时间中视其中的一点为不动点，通过其他各点与此点振幅的对比，可以得到振动的相对振幅。测量振动的仪器是用盖格式记录设备与 ЦНИПС 试验设备工厂所设计制造的低频摆锤配合使用。

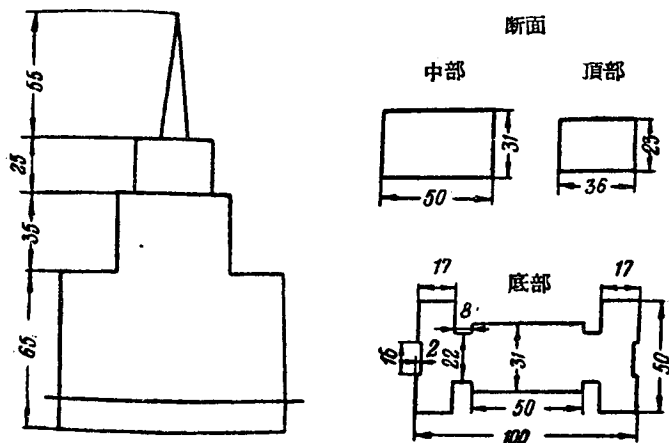


图 1 斯摩棱斯克广场大厦图

为了提高仪器的灵敏度，自记录设备中拆去中间传动槓桿及用来压住仪器针到惰性块体上的弹簧(见后)。尽管采取这样的措施，仅能在顶部的几层获得可靠的振动记录。在底部的几层上，振幅很小，或者完全记录不出来，或者因为偶然的因

素使其失真。尽管是这样的数据，將如下面所指出的，可以建立对于問題的性質方面的相当明确的概念。

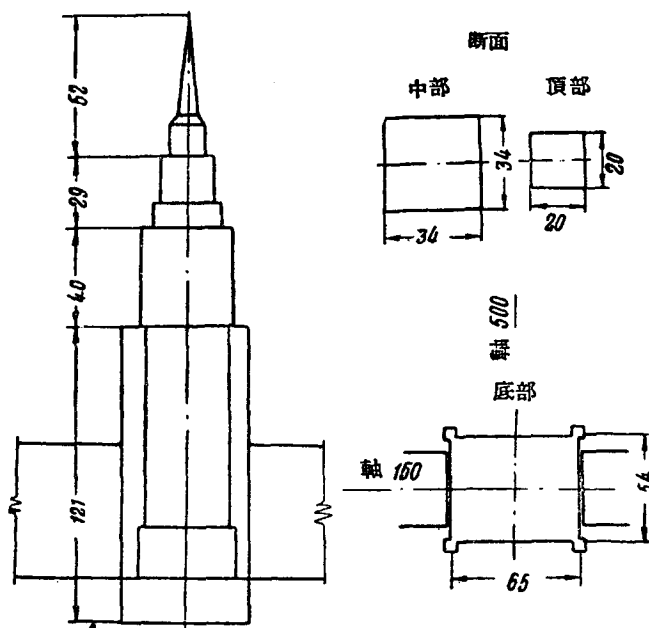


圖 2 莫斯科大學主樓圖

今后如果繼續研究高層建筑的振動時，應該放棄應用蓋格式儀器，而代以更精密更靈敏的設備。其中包括合理地應用根據光學原理所制成的儀表，它能將有缺點的因數縮減至最小，這些不利的因數是採用機械放大原理的儀表所固有的。（測讀部份的剛性，相當影響到惰性塊體的頻率，另外還有活動部份的摩擦力）。

低頻擺錘 工業建筑中央科學研究院的試驗設備工廠中為了研究高層建筑的振動，設計製造了攜帶式的頻率擺錘，利用

及懸掛錘體用的零件。

擺錘的特性	
擺錘全重	約70公斤
錘體重	50公斤
擺錘在使用狀態的總輪廓尺寸：	
長	1,350公厘
高	500公厘
寬	42公厘
錘體的旋轉重心半徑100公分	

為了能夠改變擺錘的自振頻率，錘體的系桿固定於可移動的套管上（圖4零件a）。用這個套管可以改變錘體旋轉軸對垂直軸的傾斜角，因之改變了擺錘的自振週期在4——10秒的範圍內。

記錄設備的附件 在使用蓋格式記錄設備來記錄振動時，普通應用兩階段記錄比例尺的放大。第一階段放大是借助於適當地佈置，用連桿與穿釘相連的槓桿來實現。第二階段放大是改變穿釘在筆尖上的固定位置來實現。不過在記錄高層建築的水平振動時，這樣的儀器工作簡圖並不令人滿意，因為所記錄的振動振幅和頻率都偏乎小了。

要獲得可靠的振動記錄曲線必須使因為摩擦所引起的損失減至最小，為了這個目的製造了長達250公厘的特殊連桿來代替傳動槓桿。連桿的一端直接連在錘體上，其他一端通過穿釘而與蓋格式筆尖相連，可以說實現了“直接”的記錄，這個構造簡示於圖5中。

按這個記錄簡圖，只剩下筆尖轉軸的摩擦力及筆尖在紙帶上的摩擦力，這樣，儀器的靈敏度大大地提高了。

同步記錄振動的裝置 在研究建築的振動形式時，同步地記錄振動是必需的。要求同時用兩三個記錄設備在建築物的不同地點進行記錄。

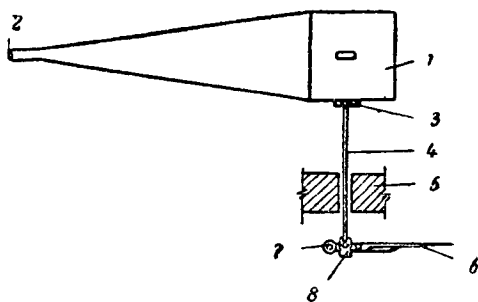


圖 5 联于盖格式記錄設備的附件

1——錘體，2——旋轉軸，3——固定連桿的小平面，4——連桿，
5——記錄設備的外殼，6——記錄筆尖，7——筆尖旋轉軸，8——穿釘

众所周知，为了記錄時間，在記錄設備上裝置了特殊的設備，它由帶平板銜鉄的电磁鉄及時間記錄筆尖所組成。电磁鉄的电源是电压为4伏、电流强度为0.4—0.5安的电池，在此同一电路中串联了一个時間断电器。如果由断电器所帶動的記錄設備的数量不多于兩個，則時間断电器的接触將工作得很好，在紙帶上所記錄的時間很清晰。如果同时接上了很多个仪器，則在电路中的电压或电流應該增大，断电器的接触点將會“燒毀”。

由于这个原故，电路圖改变成圖6所示。

此时，採用了24伏有綫電話用繼电器，它在4伏时工作得相当精确，要求10—12毫安的电流。因此，繼电器的电源可採用手电筒中用的电池。为了减小接触点起火花与燒毀，在工作电路中，与接触点並联联接一个电容为2微法拉——250伏的电容器。

振动形狀的研究 为了确定建筑物的振动形狀，用几个仪器进行同步記錄，因此，为要避免誤差，必須注意在所有測点上摆錘与記錄仪器的相互位置。为了便于整理記錄紙帶，以便

当锤体“向着仪器”或者“由仪器开始”运动时，所有仪器的记录笔尖均呈同一种形式的偏畸，也就是或“由仪器开始”或“向着仪器”。

同步地记录振动往往不是连续的，而是在个别的很短的时间段内进行；仪器及接触時計的线路，在建筑物振动已经增长

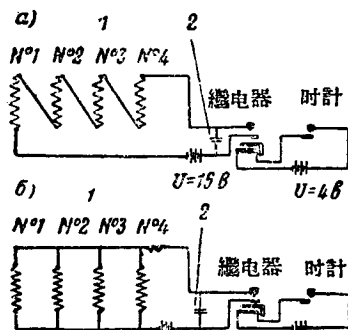


圖 6 同步记录振动的装置

a——串联，б——并联

1. 记录设备

2. 电容器2微法拉——250伏

到相当程度之后再接通，这个时间需要几分钟。此时，除了通常用接触時計记下时间外，在纸带上还记下附加的呈非直线规律部份的记录，以便找到在各个仪器的纸带上，同一时期所记录的非直线规律部份。

同步记录的振动图整理时的特点是必须求得所有仪器纸带上的振动图波峰与同步时间齿痕记录点的位移角。要算出位移角的数值，还需考虑每个仪器上的时间记录笔尖与振动记录笔尖的相对位移。

由波峰到所选择的时间的齿痕记录点的距离，考虑到在仪器上的这两种笔尖的位置，等于：

$$l_0 = a + e$$

式中 a —— 記錄儀器上的時間筆尖與振動記錄筆尖的位移。

e —— 由波峯到通過所選擇時間的齒痕記錄點的距離（見圖 7）

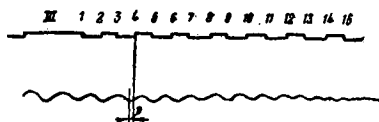


圖 7 同步記錄的振動圖

因為波長 L 相當於一個圓周（或 360° ），所以波峯與所選擇的時間的齒痕記錄點的位移角等於：

$$\varphi = \frac{360^\circ l_0}{L}$$

比較如此求得的諸點的位移角，可以判斷出各點上相互的振動相位，也就判斷出建築物的振動形狀。整理振動圖時的實踐證明，計算位移角的精確度往往在 40° 到 60° 之間，其大小由整理技術及振動按其性質與正常狀態偏畸程度為先決條件。由切線法求得振動偏畸，是非常困難的，且能降低精確度。

測定高層建築的振動形狀時，在水平剖面上企圖測出除橫向振動以外是否還有扭轉振動，以及在振動時建築物總變形是在什麼範圍之內。為了達到這個目的，裝設了三個儀器來同步地記錄振動，它們的佈置見圖 8 所示。

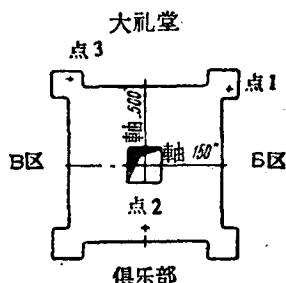


圖 8 研究在水平平面內振動形狀的儀器佈置圖

在表1及圖9中例舉了沿莫斯科大学建築的兩個主軸方向在標高為137.45公尺處的振動圖整理結果和建築的位移。此圖是按照各組記錄結果，並求其總平均值，還根據記錄的動力比例尺來進行修正的。必須進行修正的原因，是記錄儀器的錘體各個自振週期稍有不同，因而儀器的各個放大率也稍有不同。

此類修正系數的數值按下式求得：

$$k = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{p^2}} \right)}$$

式中 ω —— 建築物的振動頻率；

p —— 錘體的自振頻率。

莫斯科大学主樓中央部分振動圖整理結果，

第33層，標高137.45公尺

表1

記錄 編號	記錄階 段編號	位 移 角			各點間的位移	
		記 錄 點 編 號			1—2點	1—3點
		1	2	3		
1	2	3	4	5	6	7

a) 在軸500平面內

4	III—5	— 93	—	+ 56	—	+31
4	III—6	+ 71	—	+196	—	+55
4	III—7	+ 46	—	+182	—	+44
4	III—8	+184	—	+359	—	+ 5
5	III—15	—142	—136	+ 6	— 6	+32
5	III—16	— 4	— 17	+172	+13	+ 4
5	III—17	+173	+195	+322	—22	+31
5	IV—5	+ 32	+ 36	—185	— 4	+37
5	IV—6	+192	+216	— 15	—24	+27
5	IV—7	+352	+398	+143	—46	+29
5	IV—8	+111	+149	— 98	—38	+29

(續)

表 1

記錄 編號	記錄階 段 編 號	位 移 角			各點間的位移	
		記 錄 點 編 號			1—2點	1—3點
		1	2	3		
1	2	3	4	5	6	7

6) 在軸150平面內

6	IX-16	- 87	-	-103	-	+16
6	IX-17	+ 64	-	+ 59	-	+ 5
6	IX-18	+166	-	+212	-	-46
6	IX-19	+319	-352	+328	-49	- 9
7	I-18	-190	+225	-144	-55	-46
7	I-19	- 37	+326	0	- 3	-37
7	I-20	+100	+490	+109	-30	- 9
7	IV-18	-277	-248	+104	-29	-21
7	IV-19	-210	-151	+167	-59	-17
7	IV-20	- 58	- 34	+289	-24	+13
7	IV-21	+104	+162	-	-58	-
8	II-11	-193	+218	+218	-51	-51
8	II-12	- 56	+357	+344	-53	-40
8	II-13	+ 80	-	-	-	-
8	III-13	+ 24	+ 86	-	-62	-
8	III-14	+206	+222	-	-17	-
8	III-16	+428	+480	-	-52	-
9	0-10	- 49	0	- 77	-49	+28
9	I- 1	+ 21	+ 55	- 5	-34	+26
9	I- 2	+172	+250	+162	-78	+10
9	I- 8	+356	+378	+349	-22	+ 7
9	II- 7	-202	-154	-189	-48	+13
9	II- 8	- 99	- 26	- 86	-73	-13
9	II- 9	+ 71	+139	+ 53	-68	+18
9	II-10	+207	+213	+214	- 6	- 7

註：在沿軸 500 記錄振動時，點 3 處之儀器與錘體相互位置，與點 1 及點 2 處者正相反，因此在計算相的位移時加了一個 180° 的修正。

錘體的自振週期及修正系數列入表 2：

對表 1（相的位移）進行研究，以及位移圖證明：建築物

在平面上的振动仅仅是平动。

錘体自振週期及修正系数表

表 2

錘 体 編 号	振 动 週 期 T (秒)	修 正 系 数 k
1	4.8	0.99
2	5.0	1.00
3	4.2	0.95

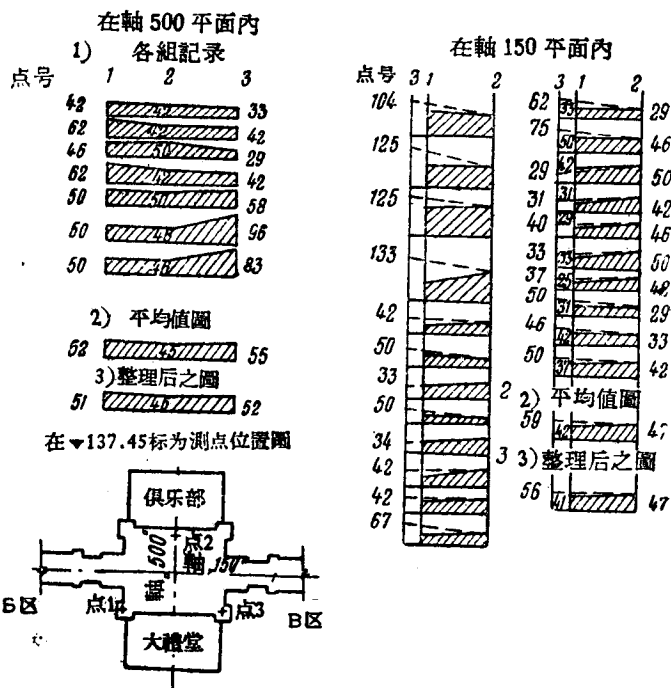


圖 9 莫斯科大学建筑第33層主樓的中央部份的位移圖
單位是千分之一公厘

柯切尼切斯闊河岸大厦在垂
直平面內的振動圖整理結果

表 3

記錄 編號	記錄地 段 編 號	第 3 3 層			第 3 0 層		
		紙帶上振	幅 頻	率	紙帶上振	幅 頻	率
		振 幅 (公厘)	(公厘) 3:24	(赫芝)	振 幅 (公厘)	(公厘) 6:24	(赫芝)
1	2	3	4	5	6	7	8
在軸65平面內							
3	I—1	1.0	0.042	0.83	0.7	0.029	0.82
3	II—1	0.9	0.037	0.84	0.6	0.025	0.83
3	IV—1	0.8	0.033	0.89	0.5	0.021	0.80
3	V—10	1.2	0.050	0.85	0.7	0.029	0.86
4	III—24	0.9	0.037	0.88	0.7	0.029	0.89
4	0—38	1.2	0.050	0.83	1.0	0.042	0.84
4	III—48	0.9	0.037	0.81	0.7	0.029	0.85
4	IV—3	0.6	0.025	0.84	0.5	0.021	0.88
5	III—14	0.5	0.021	0.85	0.5	0.021	0.87
5	II—16	0.4	0.017	0.97	0.5	0.021	0.81
5	IV—1	0.5	0.021	0.79	0.4	0.017	0.81
6	I—3	0.5	0.021	0.89	0.3	0.012	0.88
7	I—7	0.9	0.037	0.78	0.5	0.021	0.83
7	II—1	0.5	0.021	0.84	0.3	0.012	0.82
8	II—15	0.5	0.021	0.82	0.3	0.012	0.82
8	III—4	0.7	0.029	0.88	0.4	0.017	0.88
9	I—14	0.5	0.021	0.83	0.3	0.012	0.88
平 均 值			0.031			0.023	
經過用動力比例尺 修正記錄的 放大率以後			0.026			0.020	

以後又進行了沿着建築物高度的各種不同標高用兩個儀器進行振動的同步記錄。同步記錄的目的，是要確定建築物垂直平面內的振動形狀，這樣的測量曾在莫斯科大学及柯切尼切斯