

中国科学院土木建築
研究所学术委员会第二次会
议学术報告。

論地震力 刘恢先

(中国科学院土木建築研究所)

一九五七年十月

中國科學院土木建築研究所

學朮委員會第二次會議學朮報告

論 地 震 力

劉 恢 先

(中國科學院土木建築研究所)

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

一九五七年十月

論地震力

劉恢先 (中國科學院土木工程研究所)

提要：本文回顧了關於建築物地震力的理論的發展過程；對於現行的幾種理論進行了評論，認為在我國目前條件之下可以採用一種建立在動力學基礎之上的靜力理論。最後對今後的研究方向提供了一些意見。

一、緒 言

對於建築物來說，地震的作用是一種外加的強迫運動，不同於一般的荷載。一般所謂“地震力”在物理意義上是地震時建築物自身的慣性力；在實際設計中，則可以理解為一種能夠反映地震影響的等效荷載，根據這樣的荷載設計出來的建築物就能夠抗御地震，不致遭受嚴重的損害。因此，地震力決定於它所产生的效果，決定於建築物所受地震的影響。並不是所有荷載都是這樣的。一般的荷載可以不問其效果如何，獨立地加以確定。比如，屋頂上的雪荷載就只決定於當地的气候，並不決定於它對建築物的影響。這是地震力和一般荷載的不同之點，也就是研究地震力所應着重考慮的關鍵。

研究地震對於建築物的影響有兩種方法：一種是總結經驗的方法，就是在地震發生時或發生後對建築物所受影響進行細致的調查和觀察，從大量事實中去找尋規律。一種是理論和實驗的方法，就是從問題的各个方面進行反復的理論分析和實驗觀測。這兩種方法應當是相輔而行、不可偏廢的。在30年以前，人們採用的方法主要是總結經驗的方法；這種方法雖然可以揭

* 本文初稿曾以“建築物地震力的理論基礎”為題由中國力學會哈爾

濱分會於1955年5月油印散發。

899968

露一般的原則，但是不能深入到問題的本質，尤其不能作出定量的結論。關於地震影響的理論分析和實驗觀測是近 30 年來才開展起來的。在此時期，工程地震學逐漸發展成為一門邊緣學科，而這門學科的主流是在理論與實驗方面。

現代工程地震學是從兩方面進行研究的：

1. 地震時地面是如何運動的？建築物的基底在地震時可能遭受到怎樣的強迫運動？

2. 在特定的地面運動之下，建築物的反應如何？

第一個命題是屬於地震特徵的範疇；第二個命題是屬於結構性能的範疇。雖然這兩個命題之間不是完全沒有聯繫，但是它們一向是被分別研究着的。30 年來的研究有些什麼主要成就呢？概括地說，有下列幾點：

1. 用精密的地震儀測得了強地震和人工爆炸時地面運動的位移和加速度，使結構分析有了依據。

2. 對各類建築物進行了大量的振動測試，獲得了關於建築物動力性能的知識。

3. 建立了抗地震結構動力分析的理論基礎，發展了計算技術和模型試驗，並在實際設計中開始應用動力分析的方法。

4. 在新發生的地震中，取得了現代建築抗御地震的經驗。

5. 對於地基土質與建築物抗震性的關係進行了探索：按照工程地質、水文地質的條件進行地震烈度小區域劃分的工作已有初步的結果。

隨著這些知識的積累，地震力的理論逐漸由最簡單的形式發展成為較完正的體系。但是所有理論都只考慮地面運動的水平分量，豎向分量的作用，一向是被忽略的。一切理論又都是以彈性體系為基礎，對於建築物在地震作用下的非線性振動，還只有初步的研究，沒有成熟的結果。

3171 1951.11.11 5002 中 國 地 震 局 藏
作者根据自己所接触的文獻將地震力的理論分為四種：

1. 所謂“靜力理論”；
2. 用簡單數學函數模擬地面運動的理論；
3. 以實際地面運動為根據的理論；
4. 把地面運動當作隨機脈沖的理論。

本文試圖對這四種理論進行總結和評論，以供進一步研究的參考。

二、几种地震力理論的評述

1. 靜力理論

所謂靜力理論就是假定地震时，建築物各部分承受一个均匀的、不变的水平加速度，这一加速度所产生的慣性力就是地震力在設計中当作一种靜荷載考虑。其結果，地震力就成为与結構重量成比例的一种水平荷載。这个理論最初是日本大森房吉〔1〕所提出，并且从1923年东京大地震的經驗得出这样的結論：凡按0.1 加速度設計的建筑可以經得起像那次那样强烈的地震。在美国，工程师們也用同样的方法来总结地震調查中所获得的經驗。因此在很长一段时間，这条經驗成为抗地震設計的准則在各国都很通行；工程师們还把风力和地震力相提并論，认为两者的作用一致，建築物如能抗御^{风力便能抗御}地震力〔2〕。靜力理論的进一步发展是假定地震力和結構重量的比例随其高度变化。显而易见靜力理論的缺点是很多的。首先，它完全缺乏动力学的观点，没有考虑地震力与結構动力性能的关联，简单地假定建築物各部承受均匀的加速度；实际上，这个假定只能当建築物为绝对剛体时才能实现。即使建築物为剛体，它对傾复的稳定性仍然与地面运动周期有关，而不单纯决定于加速度。比如美国皮特河桥（Pit River Bridge）的桥墩〔3〕，高达360呎，如果按照0.1g的加速度来設計，几乎不可能满足工程上的要求，但当考虑到桥墩在^{假倒之前，使它}傾倒的慣性力就已经改变方向这一事实，工程师就认定没有必要按0.1g的加速度設計。日本建筑规范所規定的地震系数很高，产生了傾复作用无法平衡的矛盾，因而不得不任意地減半計算。

靜力理論的另一缺点在于採用的加速度只能是純粹的經驗数据；在此时此地取得的数据无法应用到彼时彼地。在东京大地震取得的經驗是只能在那时东京的建筑的。我們不难想像，那时的設計所採用的安全系数一定很大，計算一定很粗糙，非主要构件（如間壁等）所增强的抗震能力未

必考慮。當我們的計算日益精細，安全係數日益減小，如果仍按同樣的加速度數據進行設計，就未見得能承受同樣強烈的地震。不用說，建築形式和土壤特性都會使加速度數據發生很大的變化。

雖然靜力理論的缺點是顯著的，但是迄今還有人贊成它，認為這是從許多次地震總結出來的經驗，有一定的根據，不能隨便拋棄，尤其在低層建築中，靜力理論基本上可以適用〔4〕。迄今大多數國家（包括對地震進行長期研究的日本）的建築規範還是採用靜力理論。但是不論如何，旧的靜力理論已經過時了，當人們對於結構動力行為的規律已經逐漸掌握的時候，放棄不符合客觀實際的靜力理論是很自然的。

2. 用簡單數學函數模擬地面運動的理論

地震的作用既然在實質上是一種強加於結構之上的運動，那麼精確的計算就必須以地震時地面運動的規律為根據。但是實際的地面運動非但是十分複雜而且是无法預測的，因此用一種簡單的周期運動來模擬地震運動就成為簡易可行的方法。日本學者曾經假定地面運動為諧和振動，做了許多結構的動力分析工作〔5〕，〔2〕。除了簡諧運動不足以描繪實際的地震運動以外，已往這些工作的最大缺點是只研究結構振動的穩定狀態（Steady State），而實際上在地震過程中結構的振動是處於過渡狀態（Transient State）。孔夫列夫 К.С.Завриев〔6〕也曾經把地面運動當作簡諧運動來研究，但是他進一步考慮了結構的過渡振動。

近年科欽斯基 И.Л.Корчинский〔7〕從地震記錄的觀察假定地面的振動為若干周期不同的衰減正弦函數的疊加，即

$$\sum_i C_i e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_i t$$

又假定建築物為一有阻尼的豎立桿件，從而計算建築物的過渡振動，通過一系列的簡化，他把地震力最後寫成下式：

$$S_0 = K_0 \sum_{j=1}^n \eta_{ji} \beta_j Q_j \quad \text{--- (1)}$$

式中 S_i 代表结构上 i 点所受地震力； K_c 为地震系数，与最大地震加速度成比例，代表着地震烈度； β 为动力系数， η_i 为振型系数，均决定于结构的动力性能； Q_i 为集中于 i 点的重量。科欽斯基的方法对地震力的计算有所推进，但是其中仍然存在着很难克服的缺点。首先是关于地面运动的一些参数（包括各振动分量的振幅、衰减系数、振动频率以及相位差）如何确定的问题。在他的文章里没有提到各分量的振幅和相位差如何确定；衰减系数则是采取地震记录图上的平均衰减系数。这样取得的衰减系数至多只能代表全部振幅的衰减率而不能代表各个分量的衰减率。其次，虽然他假定地面运动为许多个衰减正弦分量的叠加，但他在随后的计算中，实际上只考虑了其中一个分量，其余分量的影响，简单地归纳为动力系数的折半计算。由于上述粗率的简化，科欽斯基理论的准确性就大大地降低了。同时，这个理论的正确性也缺乏严格的验证，没有和根据实际地面运动的计算结果作比较。苏联最近的地震区建筑规范采用了科欽斯基的理论，其中地震系数 K_c 系采用苏联现行地震烈度表中所规定的最大地面加速度与重力加速度的比值。

拉斯母生 (B. H. Rasmussen) [8] 认为地震时，真正的共振现象不可能发生，因此地震作用和单个正弦波的作用十分相似。他建议以单个正弦波的谱曲线作为抗震设计的根据，调正其中参数来适应当地震的特征。这种过分的简化是很难反映地面运动的全部特征的。

麦德维捷夫 С. В. Медведев [16] 曾经用函数

$$\beta e^{-\alpha_1 t^2} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t e^{\alpha_2 t^2}\right)$$

来模拟地面运动，他认为可以获得近似的谱曲线。以谱曲线为比较的基础来寻找能够代替实际地震的简单曲线是一个可行的方法。

3. 以实际地面运动为根据的理论

按照实际的地面运动来计算建筑物的反应是最理想的方法，困难在于实际地面运动的什乱无章，不易进行数学分析。

这个困难最初是由比阿

解决的。他提出了“地震谱曲线”的概念

[] , [10] 。所谓“谱曲线”就是单质点弹性体系对于实际地面运动的最大反应（可以用加速度、速度或位移的形式表示）和体系的自振周期的函数关系，用曲线表示出来（见图1）。复杂的结构可以简化为若干振型的叠加，每个振型又可以当作若干单质点体系来考虑。这样任何结构对于地震的反应都可以当作若干单质点体系的反应的叠加。由于实际地面运动的不规则，用数学分析方法来求解谱曲线是困难的，必须借助于计算工具。比阿本人发明了扭摆模拟方法 [11] ，划出了美国 1935 年海倫那地震的加速度谱曲线。他建议在收集了许多地震谱曲线之后，可以采用这许多曲线的共同包线为设计的根据；在当时，他并建议采用海倫那型的谱曲线作为标准谱曲线，在设计中应用。在他的计算中，忽略了阻尼的影响。此后，谱曲线计算方法日益完备，发展了数值计算（包括数值电子计算机） [12] , [13] , [14] , [15] , 图解 [16] , 电路模拟 [17] , [18] , [19] 等方法。

谱曲线的完正概念虽然形成于比阿，但在此之前，末广恭二 [20] 为了直接测量地面运动的卓越周期，曾经设计了一种地^动振分解器，由许多不同周期的摆所构成。地震时，反应最大的摆的周期便是卓越周期。这个概念在实质上是和谱曲线一致的，这样测出来的卓越周期应相当于谱曲线最高点的周期。

美国现行的关于地震荷载的规定 [21] 是以比阿的理论为根据而规定的，这个规定主要包括下列几点：

(a) 将建筑物转换为几个单质点体系的叠加，每一单质点体系代表一个振型。

(b) 将每一单质点体系的基底剪力写成侧力系数和质点重量的乘积。侧力系数与体系自振周期的关系则采用与比阿标准加速谱曲线相似的曲线。

但根据当地地震經驗选定側力系数的上、下限。

(c) 将基底剪力按照振型的特性分布于建筑全高作为地震力。

浩斯奈 (G.W.Housner) 及其合作者发展了比阿的理論，他用电路模拟的方法計算了差不多所有美国主要地震的譜曲線 [22]，并且考虑了阻尼的影响，最后得到了新的結論。主要結論如下：

(a) 阻尼对于强地震譜曲線的影响非常之大，很小的阻尼 (0.02% 临界阻尼) 就可以减小譜曲線值一半以上并可以削平譜曲線上的許多峯。使之成为一条十分平坦的曲線 (如图 1a) [22]。但是对于人工爆破所产生的地面运动，^則 阻尼的影响不那么显著 [23]。

在这里还应当指出，墨斐 M.J. Murphy [19] 用同样方法获得的譜曲線却有些不同；在有阻尼的譜曲線上，仍然出現明显的高峯。他們的差異可能是由于所用地震记录的不同，或者是計算上的誤差。

(b) 速度譜曲線比其它譜曲線更有規律，当結構的周期大于地面运动的周期时，速度譜曲線趋近于常数 [24]，[25]。他建議以包括阻尼影响的速度譜曲線为設計的依据，并提供了过去地震的平均速度譜曲線 [26] 和速度譜曲線的近似公式 [27]。

(c) 在地震时輸入振动体系的能量和速度譜曲線值有直接关系，約等于 $\frac{1}{2} M S_v^2$ (M 为振动体系的质量， S_v 为速度譜曲線最大值)，因此就可能从能量輸入与能量散失的观点来进行結構設計。他建議利用材料塑性变形来吸收輸入的能量，并作出了高耸建筑物的設計实例 [26]，[27]。

虽然浩斯奈作了无可怀疑的貢獻，但是他某些論点还是值得商榷的，在本文中将要提到这些論点。

苏联学者也独立地发展了譜曲線的方法。郊扎罗夫 A.B. Назаров [28] 应用了与加速度譜曲線完全相同的概念直接計算結構应力的包線。但他所用名詞不同，称加速度譜曲線值为“折算加速度”，意即在这样的常

加速度之下，振动体系所产生的最大位移与在实际地震情形时相等。邓扎罗夫的理论的另一特点是接受了索罗金 E. C. Сорокин 关于结构内阻尼的假设 [29]。他设计了一种直接在地震时测出位移谱曲线的多摆仪而且应用这种仪器获得了实际地震和人工地震的记录。这种多摆仪在原理上和末广恭二的地震动分解器相似。必须指出，多摆地震仪有一个很大的缺点，就是：当结构为无阻尼弹性体系时，谱曲线不是平滑的曲线而是跳动得非常剧烈，几乎包含着无数相差悬殊的峰点和谷点（参看图 1）；因此我们不可能有那样多的摆，能够有使这许多峰点都被记录下来。邓扎罗夫多摆仪只有很少的几个摆，这是不可能反映真实的无阻尼谱曲线的。但当结构有阻尼时，峰点一般被削平，这个问题便不发生了。

麦德维捷夫 [16] 把位移谱曲线和地震烈度联系起来，制成一种测定烈度的球面单摆仪。摆的自振周期和阻尼都采用最能代表普通建筑物基本振型的数值，这样摆对地震的反应就代表一般建筑物的反应，因而成为烈度的标志。对于某一特定的建筑物，他将摆的反应^乘上一个周期函数和阻尼函数；显然，这两个函数的积就具有谱曲线的意义。

从上面所述发展情况看来，按照地面运动的实际情形来进行结构的抗地震计算是世界各国的趋势，而且在理论上似乎已经相当完备。但是在实际应用上仍然存在着困难，主要是这个方法必须要有强地震的记录，而这种记录不容易取得。再则已有的谱曲线不能完全代表未来的地震，一地的谱曲线也不一定能够直接用到其它地点。比如美国的地震的特点是震中很浅，与我国情形不同，所以美国的地震的谱曲线就未必适用于我国。因此要在所有地震区积累许多谱曲线，得出一条包线不是短时期的事情。

4. 把地面运动当作随机脉冲的理论

用概率理论来寻求结构反应的数学期望值 mathematical expectation 是近年来发展着的一个方法，最早是浩斯奈提出的 [24]。他认为强地

震記录没有什么共同之点，如果有的話，那就是他們的随机性，他把这种随机性的来源归之于地震加速度在方向、大小、和時間三方面的缺乏规律和难以预测。由此出发，他把地面运动当作許多个相同的脈冲所組成，这些脈冲在時間坐标上的分布是随机的，出現的概率密度是相等的。根据这样的地面运动算出的速度譜曲線期望值为一常数。为了証明这一点，他求出十个实际地震的速度譜曲線的平均曲線，果然这条平均曲線接近于一条水平值線，但当周期很小时，这条直線逐漸下降，趋向于零。因此他断言地面运动可以作为随机分布的許多加速度脈冲来考虑，并否認地震有卓越周期存在。为了証实这种假設的合理性，他进一步在地震发生的机理中去寻找根据[30]。他认为地震的发生是由于地層中裂紋处剪应力的断續釋放，每次应力的釋放都放出一对正負号加速度脈冲，地震加速度图便是这些脈冲的随机組合（經過反射、折射）。在这里，他忽略了由于地震波引起的地面自由振动。

古德門、罗生布魯斯、紐馬克(L.E.Goodman, E.Rosenblueth, N.M.Newman [31])将浩斯奈的理論作了一些改进，不再那样的简单地假定地面运动为相同的脈冲組成，而更細致地作了下列假設：

(a) 地面运动为一系列脈冲組成，脈冲的符号和大小都是随机分布，但由于地震最終会停止，故脈冲的总和应等于零。

(b) 結構的反应等于結構对于各个脈冲的反应的总和，但任一脈冲的影响比起全部反应来是微小的。因此根据概率原理，結構的反应属于正态分布；又因为結構反应可正可負，故平均值为零。

(c) 結構反应絕對值的数学期望可以用来作为設計的指标。

根据上列假設，結構反应絕對值的数学期望可以导出为：

$$E|x| = \left\{ \frac{2}{\pi} \frac{E(\sum u_i^2)}{t} \int_0^t [\phi(t-\tau)]^2 d\tau \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中， $E(\sum u_i^2)$ 代表脈冲平方的总和的数学期望，决定于地震特征，可以用作烈度的标志：

$\phi(t-\tau)$ 为结构反应的影响函数，等于集中的单位脈冲所引起的结构位移，也可以按不同脈冲形状加以修正。

設計者的任务就是要求出 $E|x|$ 的最大值，然后按此值换算应力，进行設計。

罗生布鲁斯还采取了另一途径来寻求结构反应的期望值 [32]。他把结构的反应拆成两个正交的分量，并以这两个分量为平面坐标：这样，结构反应就成为在此平面上从原点作出的矢量。当地震加速度作随机变化时，矢量的尖端便在此平面上作随机行动 (random walk)。结构反应的概率分布在数学上和矢量端点行动范围的概率分布相似，而端点行动范围的概率分布在数学上又和在平面内热传导的温度分布相似。利用这一系列的类比和已知的关于热传导的解答，他求得了结构反应的概率分布以及它的数学期望。罗生布鲁斯还考虑了地震加速度的变化。

概率的方法虽然还在发展而且有一定的前途，但是作者认为距离实用的阶段还很远，主要有下面几个问题需要解决：

(a) 最根本的问题，地震脈冲能否当作随机分布处理，还没有经过过深入的研究。作者以为把地震脈冲当作随机分布看待在一定程度上是抹杀了地震观测已经揭露的关于强地震的一些规律。比如，地面卓越周期的存在是地震学者数十年观测的结果，就未可轻率地加以否定。即使从浩斯奈画出的许多谱曲线来看，在同一地点、不同地震的谱曲线上出现的高峰周期是很相近的：这也是有主要周期存在的一种证明。

(b) 浩斯奈及其它作者所提供的证据是十分不足的。他们所引为最有力的证据有二：第一，实际地震和随机分布的脈冲的速度谱曲线很相似；当振动体系的自振周期大于脈冲的持续长度时，两者都趋近于一

市震在地震中一个地震中上下跳动。第二，活斯泰引用了10个实际地震的速度谱曲线，它们的平均曲线非常接近于一条平滑的水平直线。

上述两个证据都不是很有力的。关于第一个证据，作者认为可以作如下解释：过渡阶段的振动可以拆成自由振动和强迫振两部分。当单质点体系的自振周期增大时，就强迫振动而言，质点趋近于空中固定点；因此质点的加速度趋近于零，最大相对位移和相对速度（对地面而言）则都趋近与地面的最大位移和速度相等，而与自振周期无关。就自由振动而言，相对位移随自振周期的增大而增大；而相对速度则保持在一常数，与自振周期无关；加速度则趋近于零。所以当体系的自振周期增大时，不论地面加速度的变化规律如何（不必是随机分布），速度谱曲线均趋近于一常数；位移谱曲线随自振周期的增大而增大；加速度谱曲线则趋近于零（参看图10）。由此可见，速度谱曲线趋近常数这一现象与其归之为地震脉冲的随机分布的后果，毋宁说是任何速度谱曲线的规律。

上述论点可以用简谐运动来证明。设地面加速度为：

$$\ddot{x}_0 = a_0 \sin \frac{2\pi}{T_0} t \quad ; \quad \text{体系自振周期为 } T, \text{ 则}$$

$$\text{质点的相对位移为：} x = \frac{a_0 T_0^2 T^2}{(2\pi)^2 (T^2 - T_0^2)} \left(\sin \frac{2\pi}{T_0} t - \frac{T}{T_0} \sin \frac{2\pi}{T} t \right) ;$$

$$\text{相对速度为：} \dot{x} = \frac{a_0 T_0 T^2}{2\pi (T^2 - T_0^2)} \left(\cos \frac{2\pi}{T_0} t - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) ;$$

$$\text{加速度为：} (\ddot{x} + \ddot{x}_0) = - \frac{a_0 T_0^2}{T^2 - T_0^2} \left(\sin \frac{2\pi}{T_0} t - \frac{T}{T_0} \sin \frac{2\pi}{T} t \right) .$$

从上式可知当 $T \gg T_0$ 时：

最大相对位移 $\approx \frac{T_0 T}{(2\pi)^2} a_0$ ，随 T 的增大而增大：

最大相对速度 $\approx \frac{T_0}{\pi} a_0$ ，不随 T 变化；

最大加速度 $\approx \frac{T_0}{T} a_0$ ，随 T 的增大趋近于零。

关于第二个证据，作者认为这也是一般的规律，并非随机分布的脉冲所独有。拿任何 10 条具有大致的规律但很不规则的曲线平均起来都会得到较为平滑的曲线。由于所有速度谱曲线都有趋近于水平直线的特征，所以这一特征在 10 条速度谱曲线的平均曲线上更为显著和平滑。还应当指出，浩斯奈所引用的十个地震记录的地点是分散在美国西部广大地区而且是不同地震的记录：由于震源和传播介质的变化，就无怪乎它们表现一定的随机特征。显然我们不能满足于采用一个广大地区的平均现象来作为结构设计的依据；相反地，我们还企图用小区域划分的方法来寻求每一城镇甚至每一建筑工地的地震特征。因此只有在同一地点所得的记录的平均谱曲线才有实际意义。

(c) 浩斯奈的理论仅仅在定性上是合理的。如果我们只求定性上的合理的话，那么我们就可以采用更简单的假定，比如假定地面运动为简谐运动；如前所述，所得的谱曲线的形态也将和实际地震的谱曲线相近似。在定量方面，按照浩斯奈的理论，结构的反应应当与脉冲次数的平方根成比例。如果这一论点能够成立的话，那么结构反应应当随地震持续时间而增大，但事实上并非如此。所以，要使随机脉冲的理论能够成立，进一步的、定量的论证是必要的。

(d) 概率的方法必须建立在大量数据之上才有实际意义，而强地震记录在目前还很稀少，将来的积累也很慢，这就给这个方法带来很大困难。

三、动力学原則在地震力計算中的运用

本文所述几种地震力理論，除第一种所謂“靜力理論”以外，其余三种都可以称为“动力理論”，因为它们都是根据动力学的原則来計算結構对于地震的反应，其区别仅在于它們所假定的地面运动的規律有所不同。因此这三种理論脈脈相通，所得的結果基本上是一致的。为了溝通这三种理論、說明它們之間的異同，下面对于結構动力学原則在地震力計算中的运用作一系統的闡述。

1. 一般假定。

目前所有計算地震力的理論都是建立在下列几个主要假定之上：

(A) 結構可以簡化為一包含許多个質点（或者为質量連續分布）并有阻尼的彈性體系。

(B) 地基平面为一剛性平面，結構固定于地基之上，結構基礎的相對位置保持不變；地面运动的豎向分量和轉動分量可以不考慮；因此地震時結構的影响以歸結為地基正体的水平振盪。对于彈性地基，則假定結構的基底可以作水平移动并對其重心軸作旋轉运动。

(C) 关于結構的阻尼，目前有两种合乎实用的假定，一为福格第 (Voigt) 假定，即假定阻尼与速度成正比；一为索罗金 Сорокин 假定，即假定表示能量散失的滯变迴線为一椭圆。后者較接近于实验結果，但是如果將福格第假定的阻尼系数 (damping factor) 取为 $\frac{\psi}{4\pi} p$ (式中， ψ 为索罗金假定中每周期能量散失与最大变形能的比例； p 为結構自振周期)，則两种假定的結果基本上能取得一致 [28]。为了計算的便利，採用福格第假定但調正其阻尼系数是可行的。

2. 求解方法。

寻求結構对于地震的反应，作为一个結構动力学的問題來說，包括两个部分：

第一部分为求出自由振动的特征，主要包括自振频率、振型形式和结构阻尼三者。这部分工作是基本的，又是很复杂的：除了极简单的结构可以进行近似计算外，一般主要依靠实验的方法来解决。可以说，如果结构的自振特征完全掌握了的话，抗地震的计算便解决了一大半。

第二部分为求解在地震作用下的强迫振动。现在已经公认在地震作用下的振动是处于过渡阶段，必须按过渡振动的理论来求解。求解的方法有二：

(A) 联立解法，就是以地面加速度为干扰力，为每个质点建立一个运动方程式，这样我们就得到一组以时间 (t) 为坐标并与未知位移的数目等的常微分方程。如果给定的体系的质量为连续分布，则可得到一组以空间和时间为坐标的偏微分方程。解出这些方程式，便可求得结构的反应。假如要用数学分析的方法来求解这些方程式，这是十分困难的，甚至是不可能的。但是如果借助于电子计算机，计算的困难就可以解决 [15] [19]。

(B) 广义坐标法，这是大家所公认的便利方法，在这里拟作简单的叙述。此法的优点有二，一为使多自由度体系简化为若干单自由度体系的叠加；一为可以应用谱曲线的处理方法。因此目前的抗地震理论莫不採用此法。

设有一包含 n 个质点 ($m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$) 的弹性体系：

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 为各质点对于地面的相对水平位移， x_0 为地面的水平位移：

$X_1(t), X_2(t), \dots, X_j(t), \dots, X_n(t)$ 为无阻尼时的主振型函数，这些函数都是互相正交的：

$p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n$ 为各主振型的圆频率：

$q_1(t), q_2(t), \dots, q_j(t), \dots, q_n(t)$ 为相应于各主振型的广义坐标。结构的形态决定于这些坐标，而结构的应力与变形又决定于其形态，所以正个问题可以归结