

关于工程地震的若干問題*

鄭哲敏

(中國科學院力學研究所)

研究工程地震是為了經濟而有效地設計和加強建築物的結構部分，使它們能夠成功地抗禦在它們的使用期間可能遭遇到的地震。我國處於一個強震活動比較頻繁的區域。因而，工程地震的研究具有明顯的現實意義。

天然的地殼振動是時刻不斷的。然而只有少數強度比較大的地震，所謂強震，方才在震中附近造成災害。

多數地震的發生是由于地球內部構造上局部的、突然的破壞所引起。隨着破壞的發生，原來是集中在破壞區域的變形能便通過波的形式被帶到地球的其他部分，在那里表現為地震。

根據歷史記載，現場調查，儀器記錄，地殼構造地質的研究，我們可以大致地知道地球內部產生地震的震源的分布，某些地區地震的破壞性和發生地震的頻率。但是我們所掌握的關於地震的知識距離工程地震所要求的還是很遠。

關於地震時地面的運動，近來才有較為可靠的儀器記錄。這些記錄為研究地面運動的特徵和建築物在地震作用下的運動提供了寶貴的資料。但是由于地震現象本身的特点，例如發生的時間和地點都不能事先知道，這類記錄的數量還很有限。根據它們所進行的研究也還數不多。因此，工程地震的這一分枝仍處於一個尚待繼續收集儀器記錄的階段。

地震災害的調查是人們借以獲得抗震知識的最原始的資料之一。直到現在，所謂宏觀調查依舊是決定地震烈度的主要方法，因為絕大多數地震烈度表是根據某些主要類型的建築物為地震所破壞的程度而制訂的。通過宏觀調查，人們逐漸總結出一些抗震的經驗，例如：那些形式的結構比另一些有較高的抗震性，那些措施可以增強建築物的抗震性。那些土質條件有利於抗震。那些有害等等。這些多年來累積的經驗顯然是非常寶貴的，我們必須繼續充實和豐富它。

從理論上來概括這些經驗，並且建立比較普遍的理論，使其應用於上述經驗範圍以

* 1957年5月11日收到。除第四節中所涉及的內容外，本報告曾在1957年2月全國力學學術報告會上發表。

外的种种更复杂的实际情况是工程地震学的另一个重要方面。这方面的抗震问题与结构动力学有密切的关系。虽然,作为古典振动学的一部分,结构动力学是一个比较成熟的学科,应用于抗震问题上却比较晚。这主要是因为强震时地面运动的知识发展得迟的缘故。另一方面,抗震结构动力学所提出来的问题自然也不是古典振动学所能概括的,例如,古典振动理论关于内阻的处理常不能满足抗震结构动力学的需要。

在这篇报告的第一部分,我们准备介绍一下抗震结构动力分析的一些问题。在它的第二部分,讨论与结构动力分析有密切关系的一些地表达运动特征的问题。结合这两部分的讨论,我们将在第三部分里定性地分析几个有利和不利于抗震的因素,作为结构物抗震设计的一般原则。

一. 结构的动力分析

如果规定了基础的运动,建筑物的动力分析可以按照结构动力学的理论进行。

关于基础的运动常常可以作如下的简化:我们假设基础的尺寸远小于地震波的主要波长,因此在基础的尺度内,地面的倾斜是微不足道的。这样,便可以认为基础所受到的地震作用只是水平方向的两个线加速度分量和垂直方向的一个线加速度分量。

其次,如果仅考虑建筑物的微小振动,这三个分量可以分别处理,然后应用叠加原理便可以得出建筑物在三个加速度分量同时作用下的振动。因此,在以下的讨论里,只取作用于基础的一个加速度分量,例如东西方向的加速度 $\ddot{v}(t)$ 。

可以把建筑物(包括基础)当作一个有阻尼的振动系统。建筑物在振动时一部分能在建筑物内部消失,另一部分通过基础消失。要准确地计算各部分的能量消失是很困难的,不过总可以通过实验方法求出建筑物中相当的粘性阻尼系数,阻尼系数的值主要因建筑物的材料和结构形式而异,焊接钢结构的阻尼系数很小,钢筋混凝土结构的阻尼系数约为 7%—15%。实验证明,振幅的大小对阻尼系数有影响^[2]。下面我们取阻尼系数的一个适当的平均值而忽略振幅对阻尼系数的影响。

在弹性小振动和粘性阻尼的假定下,根据瑞莱的研究^[3],可以把建筑物的运动方程式写作以下的正则形式:

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = C_i \ddot{v}(t), \quad (1)$$

其中 q_i 是相对于线加速度为 $\ddot{v}(t)$ 的运动座标的正则座标, $C_i \ddot{v}(t)$ 是广义力, ζ_i 是临界阻尼系数比例, ω_i 是当 $\zeta_i = 0$ 时,建筑物的第 i 个自由振动的圆周频率, $i = 1, 2, \dots$ 依次表示每一个自由度。正则座标的选取, ζ_i 和 ω_i 的数值属于建筑物的自振特性,和地面运动 $\ddot{v}(t)$ 的特性无关。

根据(1)式决定 q_i 以后,建筑物中任意一点的相对位移 \bar{u} 和应力 σ 便可以用正则座标 q_i 的线性组合表示,例如:

$$\bar{u} = \sum_i \bar{A}_i q_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sum_i \beta_i q_i \quad (3)$$

在上面的公式里 \bar{A}_i, β_i 的数值当然随着所考虑的这一点的位置而改变。但是, 要紧的是, 它们是随同正则座标系统, ω_i, ζ_i 同时决定的函数, 因而也是建筑物自振特征的一部分, 与地面运动 $\ddot{v}(t)$ 没有关系。

因此, 不论目的是在研究建筑物某一部分上的位移或者应力, 问题都归结为求正则座标 q_i 在地震作用 $\ddot{v}(t)$ 下的数值, 也就是求方程组 (1) 的解。在地震问题中, 起始的位移和速度自然都等于零, 所以我们有

$$q_i(0) = \dot{q}_i(0) = 0.$$

在这样的起始条件下, 方程式 (1) 的解是

$$q_i = \frac{\alpha_i}{\omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}} \int_0^t \ddot{v}(\tau) e^{-\omega_i \zeta_i (t - \tau)} \sin \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} (t - \tau) d\tau \quad (4)$$

近代的一种地震仪可以直接记录水平方向的加速度^[4]。因此, 在原则上, 可以根据地震记录计算上式的积分。由于地表运动的复杂性, 数字积分非常繁重, 而且误差较大, 所以常借助于计算机。适用于这项工作的一种简便的计算机是电比拟计算机^[5],^[6],^[28]。

根据上面的讨论可见, 如果已经知道了地基运动, 可以根据 (2) 和 (3) 式求出结构中各点的位移和应力。因此, 进行结构物在地震作用下的动力计算, 除了需要计算它的自振特征外, 还需要计算这样一类积分的值:

$$R_i = \frac{\omega_i}{\sqrt{1 - \zeta_i^2}} \int_0^t \ddot{v}(\tau) e^{-\omega_i \zeta_i (t - \tau)} \sin [\omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} (t - \tau)] d\tau. \quad (5)$$

我们注意到, 在整个计算过程中, 代表地震运动的函数 $\ddot{v}(t)$ 仅仅出现于上述的 R_i 之中, 而不出现于任何其他的地方。同时, 不论对建筑物的那个自由度而言, R_i 有共同的形式。正是由于以上原因, 有需要一般地研究积分

$$R = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \int_0^t \ddot{v}(\tau) e^{-\omega \zeta (t - \tau)} \sin [\omega \sqrt{1 - \zeta^2} (t - \tau)] d\tau, \quad (6)$$

在参数 ω 和 ζ 的各种组合下, 和各种地震作用下的性质和数值。这样的结果, 不但可以应用于同一建筑物的各个不同自由度, 而且也可以应用于不同的建筑物。

用这样的方法研究积分 R 的另一个意义在于, 它可以揭示地震时地面运动的一些重要的特征。关于这一点, 我们在下一节解释。

R 是时间 t 的函数, 仍然是过于复杂。因此, 目前所研究的只是 R 的最大值^[6]^[7]

18)。以下我們討論,当 R 的最大值为已知时,一个估計建筑物里的应力和位移的方法。

根据真实地震記錄所得到的 R 最大值曲綫如圖 1 所示, 这样的曲綫称为振譜, 由于 R 的單位是加速度, 所以又称为加速度譜。

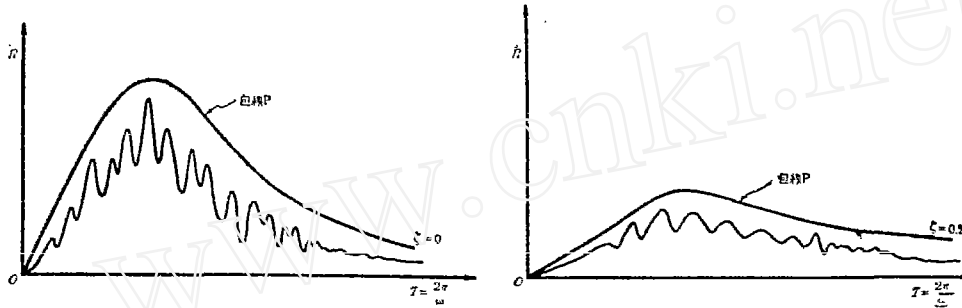


圖 1.

根据歷次地震記錄, 可以得到一系列的振譜, 作这些振譜的“包綫” P , 使所有振譜都被“包”于 P 之下。(見圖 1) 这样, 如果已經有了比較多的地震記錄, 我們便可以假設: 產生比包綫 P 所規定的更大的 R 的那種地震在將來只有很小的發生的可能性。以 $R_p(\omega, \zeta)$ 表示包綫 P , 我們有

$$|\sigma| \leq \left| \sum_i \frac{B_i C_i}{\omega_i^2} R(\omega_i, \zeta_i) \right| \leq \sum_i \frac{|B_i C_i|}{\omega_i^2} \left| R(\omega_i, \zeta_i) \right|$$

$$\leq \sum_i \frac{|B_i C_i|}{\omega_i^2} R_p(\omega_i, \zeta_i), = \sum_i \alpha_i R_p(\omega_i, \zeta_i), \quad (7)$$

$$\alpha_i = \frac{|B_i C_i|}{\omega_i^2} \quad (8)$$

α_i 与地震运动无关, 而是純粹屬於建筑物的自振特性的物理量。

$R_p(\omega, \zeta)$ 可以認為是已知函数, 因此, (7) 式可以作为抗震計算中用以進行强度校核的公式。强度的要求自然是使 $\sum_i \alpha_i R_p(\omega_i, \zeta_i)$ 小于允許应力(或極限应力)。

早奧特和別斯布林赫夫曾提出过这种应用包綫的計算概念^[11], 它的优点是应用簡便, 缺点是常过分偏于保守, 保守的方面有两个:

1. 取包綫上的 R 值相当于, 根据歷史上最强烈的地震進行强度計算, 在大多数地区, 强震并不常常發生, 因此, 用歷史上最大的地震作标准是过于保守的。

当然, 取包綫并不是必要的, 如果將曲綫 $R_p(\omega, \zeta)$ 理解为过去地震振譜的某种平均值, 那末上述計算方法仍然可行。

2. 不等式 (7) 的取法过于粗糙, 因而过高地估計了可能到达的应力, 因为实际上, $\sum_i \frac{B_i C_i}{\omega_i^2} R(\omega_i, \zeta_i)$ 式中各項有相互抵消的可能。

(7) 式究竟保守到何等程度，不是一个可以作一般性答复的問題。顯然，如果 $\sum_i \frac{B_i C_i}{\omega_i^2} R(\omega_i, \zeta_i)$ 中有一項远較其他各項大，那末 (7) 式并不过于保守。

如果对地震时的地面运动作些适当的假定，可以改進不等式 (7)，在一定程度上照顧到 $\sum_i \frac{B_i C_i}{\omega_i^2} R(\omega_i, \zeta_i)$ 中各項相互抵消的現象。在这个意义上，誤差的应用可以改進。当然，这些假定是否适当，只有在更多的地震記錄的研究之后，方才能作結論。

从假設地基按照地震記錄所規定的方式运动出發而進行的結構物的动力計算現在还为数很少。这类計算非常繁重，因此需要应用大型計算机。关于高層建筑在地震作用下的理論分析，可以參看董鉄宝先生的論文 (文献 [12]) 和文献 [13] 柯楼^[13] 計算了

$$\left| \sum \frac{B_i C_i}{\omega_i^2} R(\omega_i, \zeta_i) \right| \text{ 和 } \sum \frac{|B_i C_i|}{\omega_i^2} R(\omega_i, \zeta_i)$$

并且比較了它們的差別。根据他的計算，用迭加各个自由度的絕對值的办法，高層建筑中剪力的計算平均值可能估高了 18%，在高層建筑的頂端誤差更大，比准确的計算值可以相差 69%。這項工作，至少就高層建筑而言，說明应用不等式 (7) 所可能引進的誤差。

豪斯納和霍德森^[16] 曾根据地基振动的記錄計算过一个簡單厂房的振动：地震波系由人工爆炸產生，放在地基上的地震仪直接記錄地基的加速度。为了与計算結果進行比較，他們同时也測量了二楼楼板的加速度。結果表明，理論計算和实测数据的比較是十分滿意的。因此，可以作这样的結論：如果結構物的动力特性不很复雜，理論分析有可靠的精确度。

文献 [12], [13], [15] 都指出，根据强震記錄所作的动力計算都要求建筑物有远比現行一般抗震規范所要求的更高的强度。而我們知道，这些規范，固然多半是經驗性的，却并不是嚴重地偏于不安全。顯然，理論計算或者是理論結果的解釋上存在着問題。理論与經驗間的差別可能是由于下面几个原因：

1. 理論沒有充分估計到建筑物的承載能力。
2. 理論上計算的自振特性与实际情况有較大的出入。
3. 在理論里忽略了像非綫性阻尼，永久变形等因素。
4. 地震时地基实际的运动与地震仪所記錄的有区别。

我們認為实测建筑物的动力特征。在震区实测建筑物所受到的地震作用，是分析以上各种因素的主要途徑。

第 4 項牽涉到土質条件和地形条件对于烈度的影响問題。这方面的理論研究还很欠缺，关于經驗的一些方法，可以參看文献 [32]。

二. 地表运动特征

经过特别设计的地震仪能够记录强震时地面的加速度或位移。这些记录说明，地震时地面的运动是复杂而不规则的，并且具有很大的随机性。表面上看来即使是同一地区的历次记录之间也很少共同的特点。

工程地震研究地表运动的目的是为了进一步揭示这类运动的规律和特征，以便为结构物的抗震计算提供资料。

在讨论结构的动力分析时，引进了这样的一个式子：

$$q = \frac{C'}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega} \int_0^t \ddot{v}(\tau) e^{-\omega\zeta(t-\tau)} \sin \omega\sqrt{1-\zeta^2}(t-\tau) d\tau. \quad (9)$$

前面提到，可以就这个表示式研究地面运动的特征。本节的讨论将集中在这一点上。

(9) 式所表达的自然是一个单自由度振动系统在地面加速度 $\ddot{v}(t)$ 作用下的强迫振动。与 (9) 式相对应的物理系统可以用图 2 表示。其中 m 表示质量、 q 是 m 和地面之间的相对位移、 ab 和 $a'b'$ 代表弹簧，它们的共同弹簧系数是 $K = m\omega^2$ ， c 是阻尼系数，它与临界阻尼系数的比例是 ζ ， $\ddot{v}(t)$ 在这里表示地面的水平加速度，应用于这样一个系统，(9) 式里的 $C' = 1$ 。因此，研究积分式 (9) 也就是研究一个单自由度振动系统在地震作用下的位移。

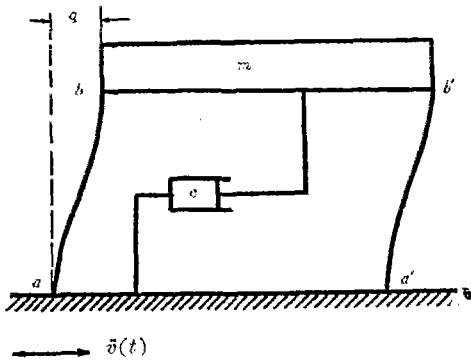


图 2.

日本的抗震工作者很早以前便尝试用 q 的值来描述地面运动的特征。1941 年以来豪斯纳扩大和充实了这方面的研究内容^{[8], [9]}，

并且提出来了新的看法。麦德维捷夫在相似的理论基础上设计了强震仪。这是一个双自由度，具有一定自振频率和阻尼的机械振动系统，直接记录由地震所产生的水平方向的最大位移。麦德维捷夫拟定了以这个强震仪所记录的最大位移为重要参考数据的地震烈度表^[17]。

从 (9) 式出发进行地面运动分析的一个方面，也是工作得较多和较有成效的一个方面，是在参数 ω 和 ζ 的各种组合下关于 q 的最大值的研究。换言之，就是所谓振谱分析。到目前为止，适用于作振谱分析的强振记录在美国约有十余个。根据它们，豪斯纳计算了八十多个振谱曲线，其中绝大部分发表在文献 [10] 里。我们将利用它们说明一些地震特征。但需要注意，既然这些结果是根据国外的地震记录得来的，其中某些数

据,甚至某些特性,不能認為是可以无保留地代表我國各地震区的地表运动特征。由于豪斯納在振譜方面的工作是我們手边有的資料,同时由于这些資料所說明的地震特征有一定的普遍意义,我們將在这里就一些主要的結果作些介紹,并借此說明進行振譜分析的方法。

根据振譜座标的選擇,振譜可以分为位移譜,速度譜和加速度譜。它們之間有很簡單的轉換关系。加速度譜的座标軸是 $\left(T = \frac{2\pi}{\omega}, m\omega^2 q_{\max}\right)$,速度譜的座标軸是 $\left(T = \frac{2\pi}{\omega}, m\omega q_{\max}\right)$,位移譜的座标軸是 $\left(T = \frac{2\pi}{\omega}, mq_{\max}\right)$ 。虽然在名称上有加速度,速度和位移之分,實質上它們都表示而且僅僅表示在地震作用下一个單自由振动系統的最大位移 q_{\max} 。在任一条振譜曲綫上臨界阻尼系数比 ζ 維持为一常数。

根据为数还不很多的地震加速度記錄所做的振譜有下列主要特点:

(1) 当阻尼很小或者等于零的时候,在相当固定的周期 $\left(T = \frac{2\pi}{\omega}\right)$ 範圍內, $m\omega^2 q_{\max}$ 的值較大而且波动非常剧烈:微小的周期差別使 $m\omega^2 q_{\max}$ 的值發生顯著的跳躍。同时,振譜圖上与各个高峯相对应的周期,对不同的地震而言,沒有确定的数值,似乎完全是随机的。

在上述周期范围以外, $m\omega^2 q_{\max}$ 的值較小。当周期趋于零和无穷大时, $m\omega^2 q_{\max}$ 趋于常数和零。在長周期的一端,波动亦小。

(2) 少量的阻尼使振譜曲綫發生顯著的改变。它很有效地降低 $m\omega^2 q_{\max}$ 的值,而且减少它的波动,使振譜曲綫趋于平滑。

第一項結果說明,把地面运动理解为簡諧运动是沒有根据的。真正的地面运动是由很多个不同周期,但周期相近的簡諧运动組合而成。由于振譜曲綫上高峯的位置是不确定的,組成总的地面运动的各个簡諧运动部分可以認為是具有按照某些机率分布的周期和振幅。又由于 $m\omega^2 q_{\max}$ 曲綫的高峯比較集中地存在于一个較为固定的周期範圍內,必須承認地面运动具有主要的周期范围这一事实。影响周期范围的因素除了發生地震的机理本身而外,还有地震仪所在地的土質和地形条件。至于那个因素起主要作用則是一个必須依靠实际測量才能答复的問題。日本的抗震工作者着重于根据土質和地形条件研究所謂地面运动的“卓越周期”。这样的周期决定于当地的土質和地形,它与地震發生的机理沒有直接的关系。因此,可以用人工地震的方法進行測量。

日本的抗震工作者有他們自己的一种分析地震运动主要周期的方法。他們所謂的卓越周期和我們根据振譜所定出的主要周期范围有着不同的含意。因而,难以作定量的比較。不过,定性地說,日本的經驗是,在土質較硬的区域,周期范围較低和較窄;在土質軟的地区,情况恰恰相反。

以美國地震的振譜为根据,豪斯納企圖用地震發生的机理來說明振譜的一些特性。一个振譜与另一个振譜間之差別被認為由地震發生的机理間的随机性差別所引起。他指出^[9],在完全随机的脉冲作用下,可以得到与地震作用下相似的振譜。最近^[19],在改進上述理論之后,他得出了理論上的地面加速度圖,与真实地震記錄頗为相近。这样的“人工地震”,如果被証实为接近于真实情况,对抗震計算將是非常有用的。

第二項結果說明阻尼在降低振幅和应力这方面所起的重要作用。由于建筑物都是有阻尼的,对抗震計算有用的是那些包含阻尼的振譜曲綫。也正因为是这样,可以用振譜規定地震烈度。我們知道, $m\omega^2 q_{\max}$ 的值是周期 T 和阻尼系数比 ζ 的函数。因此可以把 $m\omega^2 q_{\max}$ 寫作:

$$m\omega^2 q_{\max} = F(T, \zeta)$$

依照麥德維捷夫的假設 [18], [31], 如果在一定地区, 歷次地震所產生的地震震譜都是相似的, 則有

$$m\omega^2 q_{\max} = K f(T, \zeta),$$

$f(T, \zeta)$ 是一个适用于不同地震的共同函数, 可以認為是一个标准地震的振譜。 K 的值則隨地震的强度而异。因此, K 或者是 K 的任意倍数可以用來規定烈度。如果使烈度与 K 成正比例, 最大应力又大致与 q_{\max} 成正比例, 最大应力便同这样規定的烈度成正比例。因此, 这样的烈度表有直接的結構动力学上的意义。同时, K 的值可以借仪器直接測定, 而无需依赖于整个振譜的确定。假設有一个單自由度的振动系統, 它的周期和阻尼比各为 T_0, ζ_0 , 在两次地震作用下的最大位移各为 q_{\max} 和 q'_{\max} , 則标志这两个地震烈度的常数 K 和 K' 有下列关系:

$$\frac{K'}{K} = \frac{q'_{\max}}{q_{\max}}$$

上式的左端是仪器直接測量的数值、因此, 除了一个无关重要的比例常数之外, K' 的值可以根据上式决定。

麥德維捷夫進一步假定下面的相似关系:

$$f(T, \zeta) = \alpha(T)\beta(\zeta)$$

并且对 $\alpha(T)$ 和 $\beta(\zeta)$ 的取法作了建議^[18]。

关于相似性的假定是否与实际情况相符? 有什么样的限制? 还有待于進一步的澄清。

三. 抗震設計的几个一般性原則

在这一節里, 我們定性地討論几个問題(例如, 建筑物的剛度是大的好, 还是小的好), 作为進行結構物抗震設計的一般原則。

首先应当肯定,地震对建筑物的破坏*是可以防御的。过去的經驗說明,如果采取适当的措施,不論是磚石結構,鋼結構,鋼筋混凝土結構或木結構,都可以避免嚴重的地震破坏。事实上,許多破坏的造成是由于設計或施工上明顯的錯誤,例如,固定得不好的飾物、連接不良的牆壁接头、澆注得不得当的混凝土、質量沒有得到保證的灰漿等等帶來許多无謂的損失。在这些方面如果給以适当的注意,便能避免很多生命財產的損失。这一点是值得強調的,虽然,在这里,我們不拟討論具体構件的設計和施工問題。

所有的地震災害調查都指出**,破坏百分率高的是那些經不起橫向載荷的建筑物。相反地,充分估計到橫向載荷之后所設計的建築却能够順利地抗御像1923年在日本关东地区發生的大地震。

我們知道,地震时建筑物所受到的橫向載荷主要是地基的水平加速度產生的。因此,以上事实說明,在抗震設計問題上,应当把地面的水平加速度作为主要因素來考慮。一般建筑物,因为必須承受自重,在垂直方向上有較高的强度。如果在設計中,又考慮到橫向載荷,垂直方向上的强度常常同时得到提高。因此,通常不考慮垂直加速度所引起的結構强度問題。

我們設想在建筑物上添加構件,用來加强它的承受橫向靜力載荷的能力。这些構件必然减少建筑物在相同橫向載荷下的变形。于是,它們增加了建筑物的剛度。地震作用是瞬时的,它所引起的橫向載荷与質量成正比,質量愈大橫向載荷也愈大。因此,我們又要求这些構件有較小的質量。換句話說,为了加强建筑物的抗震性,所增添的構件必須使建筑物的剛度的提高相应地大于它的質量的增加。所以总的效果表现为加固后的建筑物的自振頻率的提高。当然,自振頻率提高后, R 的值也随着改变。如果它被提升到上一節所談的主要周期范围之內,而且如果建筑物的內阻又不是适当的大的話, R 的值可能有顯著的增加。在这种情况下,提高建筑物的自振頻率反而有害于抗震。但是,一般地說,利多于弊。地震災害的調查支持这样的結論。

根据第一節中所討論的,結構动力分析的方法,可以証明建筑物里的应力 σ 約与 $\frac{\alpha E}{L\omega_0^2}R'(\omega_0, \zeta)$ 成正例,其中 α 是地基运动的最大加速度, $\alpha R' = R$, E 是楊氏模数, L 是建筑物的特征長度, ω_0 是它的自振圓周頻率。根据量綱分析,我們又有 ω^2 和 $\frac{E}{L^2\rho}$ 間近乎正比例的关系(ρ =密度)。如以 σ_0 表示材料的彈性極限,以 $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ 表示安全系数,那末

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} \sim \frac{E}{L\omega_0^2\sigma_0} R(\omega_0, \zeta)$$

因此,如果两个建筑物有相同的自振周期,那末在同一地震作用下,有着較大的

* 在这里我們只討論地震对建筑物的直接破坏,不涉及間接破坏,例如火災等。

** 可參看文獻[16],[20],[21],[22],[23],[24]。

$\frac{\sigma_0}{E}$ 建筑物將更为安全。如果維持一定的安全系数,用 $\frac{\sigma_0}{E}$ 較大的材料建成的結構可以有較低的自振頻率,(我們假定 $\frac{R}{\omega_0^2}$ 隨 ω_0 的增加而減少。这个假定至少在內阻不是很小的情況下是成立的)。从这个观点看,为了保持相同的安全系数,混凝土結構應該比与它相似的鋼結構或木結構有較高的自振頻率。

如果建筑物所用材料的阻尼具有粘性阻尼的性質,也即阻尼隨应变率而增加的性質,那末增加自振頻率就必然同时增加臨界阻尼系数比,这一点曾由 Suyehiro [16] 指出。因此,在这个意义上,增加自振頻率也是有利于抗震的。

为了保証建筑物有較高的剛度,基礎的剛度也必須是相应地大,否則,建筑物的剛度是难以維持的。在地震时,能保証建筑物的底脚不發生相对位移的基礎是最理想的基礎。在硬度高的土質上,地基本身便有較强的剛度,只要結構物不是很重,就可以不用基礎。在土質軟的地区,有必要用剛度較大的基礎。日本的地震灾害調查 [27] 曾指出,同样的木結構,建筑在軟地基上的受到地震破坏的百分率較高,在硬地基上的較低。这可能是因为,軟地基上的那些房子的柱脚在地震作用下被震散。如果用适当的基礎把柱脚連接在一起,这种破坏便可以避免。

我們把基礎理想为剛体來討論地基的作用。相对于地基,基礎可以有沿 $x-y-z$ 軸的三个位移分量和三个旋轉分量(圖 3)。地基对于基礎的作用可以用与以上六个位移和旋轉分量相应的六套彈簧和阻尼器代表。我們注意到,即使地基是完全彈性的,阻尼器仍旧是必要的,因为基礎振动时部分能量就通过地基傳入地壳,这部分能量对基礎的振动說,是一种損失。

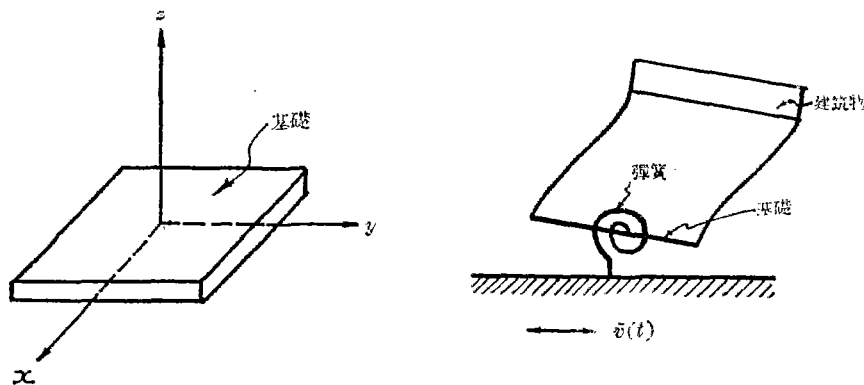


圖 3.

考慮下面这个情况:假設地基上只有一个抵抗轉动的彈簧,如圖 3 所示。在地面水平加速度 $\ddot{v}(t)$ 的作用下,建筑物的基礎,除了水平方向的运动外,还会有轉动。轉动彈簧的彈簧系数代表地基的剛度,剛度愈大,彈簧系数亦愈大。麥瑞德和豪斯納 [14], 用

真实地震加速度記錄,为这样的一个建筑物進行过計算。他們指出,地基的彈性降低建筑物里由地震產生的应力。地基的剛度愈低,应力减少的也愈多。但是他們認為,考慮利用地基的有限剛度以減輕地震的作用,对高層建筑物是不现实的,因为高層建筑的地基必須有适当高的剛度。这项研究結果表明,在不影响地基的承载能力这个条件下,减少它的剛度是有利于抗震的^[26]。

最后,我們談一下建筑物里,剛度和質量分布或分配的問題,这个問題也关系到建筑物的布局^[26]。我們用下面一个例子說明本問題的性質。設在同一地区有两个方位相同的建筑物,如圖4所示。建筑物A和B的結構完全一样,只是B的右端剛度較

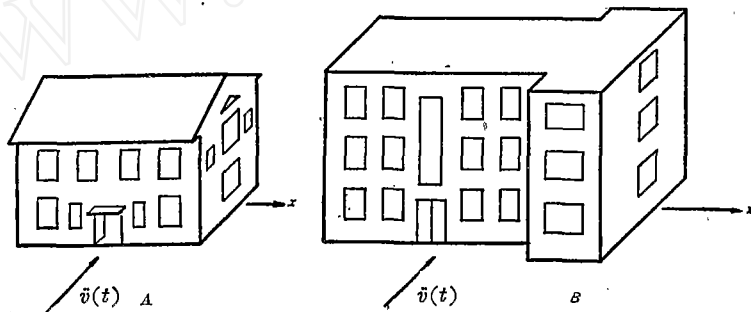


圖 4.

大。建筑物A在x方向有比較均匀的剛度和質量分布。所以在地震 $\ddot{v}(t)$ (垂直于圖4中的x軸)的作用下,A里的应力在x方向也是比較均匀的。在B中則不然。由于它的右端剛度較大,应力分布在x方向便有了較大的改变。因此,如果A是安全的話,B却可能受到破坏。即使不受到破坏,它的設計与A相比仍然是比較差的。因为B里的应力既然不均匀,这就意味着,B里各部分有着不同的实际到达的安全系数。所以,不是某些部分过于保守,就是另一部分过于不安全。这都表示材料的强度沒有得到最有效的利用。

这个例子指出,适当地分配質量和剛度,以便使建筑物的各部分在地震作用下,达到比較均匀的安全系数,是一个值得注意的問題。在加强建筑物的抗震能力时,剛度和質量的分配問題也应受到注意。否則,不适当地增加建筑物的結構部分,反而会損害它的抗震性。

四. 对开展工程地震工作的几点看法

我們認為工程地震工作包括下列三方面:

1. 有关地震的原始資料的獲得和累集。这里除了地震現象的宏觀調查和地震儀記錄外,还包括真实建筑在地震作用下振动的測量。
2. 全國烈度区域的划分和建筑物抗震規范的制訂。

3. 研究地震对于建筑物的作用。这里主要的工作是:

i) 有关地震时地面运动的原始资料的分析, 研究在不同地质和地理条件下, 地面运动的特征。

ii) 真实建筑物动力特征的实测。除了自振频率, 自振形式, 相当阻尼之外, 还应当研究建筑物破坏的经验准则。这项工作是很重要的, 除了它本身的直接应用价值外, 还将校验理论分析的准确性, 为理论分析供给资料, 并为进一步改进理论创造必要条件。

iii) 地震作用下建筑物动力计算的理论的研究, 包括,

a. 研究怎样将真实结构简化为可以进行动力计算的模型。在这里除了建筑物本身外, 还要考虑基础与建筑物的相互影响。

b. 根据真实地震, 进行一系列建筑物模型的动力计算, 找寻地震作用下建筑物振动的经验规律。

c. 根据地震时地面运动的特征和地征运动的随机性, 研究并建立适应于这些特点的动力分析的理论。

为了解决我国的抗震问题所采取的步骤, 按其先后次序, 我们认为应该是,

1. 作出我国烈度区域的划分, 在先采用外国规范的原则下, 首先制订我国抗震规范, 使建筑设计在抗震措施方面有所遵循。个别特殊重要的建设工程的抗震问题最好由有关单位研究和解决。

各国对于地震烈度划分的方法并不一致, 根据它们自己的烈度而规定的抗震规范又各是结合着本国建筑的特点。因此, 当采纳外国规范作为我们自己的规范的时候, 在关键的地方, 必须经过外国建筑特点和我国建筑特点的全面比较(例如: 一般设计规范, 用料、施工等)。

我们认为应该在较短的时期内制定这样一个规范。它虽然不会是令人十分满意的, 但在目前地震资料缺乏的条件下却是完全必要的。

2. 在我国自己的地震记录研究的基础上, 在结构动力分析理论的基础上, 在我国主要类型建筑物动力特性和地震作用实测的基础上, 配合客观调查的结果, 定期地审查和改进烈度区域的划分和抗震规范。

这项工作, 由于地震现象本身的特点, 必然是长期的。同时在我国还存在着一些特殊的困难:

i) 地震作用的仪器资料非常缺乏。

ii) 现有较新式和新建的建筑物还没有受到过地震的考验, 虽然我们比较丰富的小民房的破坏资料和历史资料。因此缺乏实践对抗震理论或抗震措施本身的考验。

基于以上的分析,我們認為現在應該而且可能开始的工作包括:

1. 設計和制造强震測量設備,建立觀測系統。在最近期間开始原始資料的收集。
2. 在地震區建立动力性能比較簡單同时又有代表性的建筑。在其中按置动力測量設備,准备接收数据。
3. 实测房屋或其他建筑物的动力特征。相应地進行理論計算。進行实测与計算的比較,首先确定綫性理論的可靠性和可能需要的修正。并且根据实测,初步找出結構物破坏的准則,以及計算建筑物动力特征的經驗公式。
4. 在現有地震資料的基礎上,逐步建立抗震的結構动力分析理論。

五. 結 束 語

以上我們把与結構动力学关系較为密切的一些抗震問題作了簡單的介紹,討論了一些这方面已有的成就,并企圖指出目前存在着的問題。在第四節里我們提出了对工程地震工作的一些很不成熟的看法,希望讀者指正。

在進行本報告所涉及的總結工作时,中國科学院力学研究所彈性力学組的同志們参加了討論,并且提出了許多宝贵的建議和供給了有关的資料,謹在这里表示謝意。第四節的諸項意見是在与董鉄宝先生数次討論之后形成的,也在这里表示感謝。

報告中有处理不当之处应由作者負責。

參 考 文 獻

- [1] Kanai, K. and S. Yoshizawa, On the damping of vibration of actual buildings, (I), *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **30**, 1952, pp. 121.
- [2] Alford, J. L. & G. W. Housner, Dynamic test of a four story reinforced building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **43**, 1953, pp. 7.
- [3] Rayleigh, L., The theory of sound, vol. 1, Chapt. 5, Dover Publication, New York, 1945.
- [4] Hershberger, J., Recent development in strong-motion analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **45**, pp. 11, 1955.
- [5] Housner, G. W. & G. D. McCann, The analysis of strong-motion earthquake record with electric analog computer, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **39**, 1949, pp. 47.
- [6] Biot, M., Theory of elastic systems vibrating under impulse with application to earthquake-proof building, *Proc. Nat. Acad. Soc. U.S.A.*, **19**, 1933.
- [7] Biot, M., Theory of vibration of buildings during earthquakes, *Z.A.M.M.*, **14**, 1934.
- [8] Housner, G. W., Calculating the response of an oscillator to arbitrary ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **31**, 1941.
- [9] Housner, G. W., Characteristics of strong-motion earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **37**, 1947.
- [10] Housner, G. W., R. R. Martal, J. L. Alford, Spectrum analysis of strong-motion earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **43**, 1953.
- [11] Biot, M. A., R. L. Bisplinghoff, Dynamic loads on airplane structures during landing, NACA War-time Report w-72, ARR 4H10, Oct. 1944.
- [12] Tung T. P. (董鉄宝) & N. M. Newmark, Numerical analysis of earthquake response of a tall building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **45**, 1955.

- [13] Clough, R. W., The importance of higher modes of vibration in the earthquake response of a tall building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **45**, 1955.
- [14] Merrit R. G., G. W. Hoursner; Effect of foundation compliance on earthquake shears in multi-story buildings, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **44**, 1954.
- [15] Hudson, D. E., J. L. Alford, G. W. Hoursner, Measured response of a structure to an explosion generated by ground shock, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **44**, 1954, pp. 513.
- [16] K. Suyehiro, Engineering Seismology, part 2, Proc. ASCE, 1932.
- [17] С. В. 麥德維捷夫, 新的地震烈度表, 地球物理学报, **4**, 1955, pp. 193.
- [18] Медведев, С. В., Колебание вертикальной системы при горизонтальных сейсмических воздействиях, *Сборник статей по сейсмологии*, № 35 (163), 1956.
- [19] Hoursner, G. W., Properties of strong ground motion earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **45**, 1955, pp. 197.
- [20] The effects of the San Francisco earthquake of April 18th 1906 on engineering construction, Report Trans. ASCE, CIX, 1907.
- [21] 关东地震調査表報告: 第一, 第二報 (地質調査所特別報告第一, 二号) 日本东京大正十四年三月農商務省編. 大正十四年七月國工省編.
- [22] Steinbrugge, K. V., D. F. Moran, An engineering study of the southern California earthquake of July 21 1952 and its aftershocks, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **44**, 1954.
- [23] 十勝沖地震調査報告, 1954. 日本, 东京十勝沖地震調査委員會編.
- [24] 謝毓寿, 一些有关地震对建筑物影响的問題, 地球物理学报, **4**, 1955, pp 163.
- [25] 金井清, On the damages to buildings due to earthquakes, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **25**, 1947, pp. 61.
- [26] 金井清及 T. Tanka, On the damage to buildings by Inaichi earthquake of Dec. 26, 1949, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **28**, 1950.
- [27] 金井清, Relation between the earthquake damage of non-wooden buildings and the nature of ground, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **27**, 1949.
- [28] M. Biot, A mechanical analyzer for the prediction of earthquake stresses, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **31**, 1941, pp. 151.
- [29] 下鶴大輔, Study on the coefficient of internal friction of materials used in civil engineering and architectural structures, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **27**, 1949.
- [30] 金井清, 田中貞二, 鈴木富三郎, Vibration experiment with actual buildings, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **27**, 1949.
- [31] С. В. 麥德維捷夫, 工程地震中的几个問題, 即將在地球物理学报刊載.
- [32] С. В. 麥德維捷夫, 地震烈度的估計与土質条件的关系, 地球物理学报, **4**, 1955, pp. 173.

A REVIEW ON ENGINEERING SEISMOLOGY

CHENG, CHE-MIN

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Paper reviews the present status of engineering seismology from the point of view of structural dynamics. It discusses the characteristics of strong-motion earthquakes, vibration analysis of structures caused by earthquakes, and some general rules on aseismic designs. Suggestions to further researches are outlined.