

场地地震运动特征及其对工程设施的影响*

王钟琦 赵树栋

(中国建筑科学研究院勘察技术研究所)

摘要

本文试图指出地震工程中尚未得到重视和研究的一个重要方面——场地波动特性对工程设施震害的决定性作用,而这种波动特性又取决于地震区场地的地质地形条件。

文中列举了一些地面震害的特性类型,它们表明场地在地震中以特定的形式作整体波动,因而地面上的工程设施也就屈从于同样的形式而产生破坏。这种运动形式和特点并不能用现有的地面(质点)运动反应分析方法进行解释和概括。因此,文章从波动场的概念和有关理论对列举的一些场地运动特征进行了初步分析和研究,并对相应的抗震问题提出了新的见解。

一、场地运动的特定破坏形式

强震区的宏观调查经验表明,大量的震害现象与其所在场地运动特征有密切关系。所谓场地运动是指远较建筑物地基范围更大的场地在地震过程中的整体运动,以及在强烈地震的极震区内某些特殊形式的地面运动。对于这种运动至今研究得很不够,并且由于下面的一些原因而使现有分析方法不能适用于分析地面波动的特征:(1)大面积的场地运动主要受控于场地的整体波动形式,而不是受控于某一点上的运动参量(位移、速度或加速度);(2)强烈的场地运动在整体上常常不是弹性的,因此,在以波动方程及土的动弹性参数(波速、泊松比、剪切模量等)为基础的现有动力反应分析方法,往往不足以概括这种运动的性状;(3)在某些极震区,地面运动具有极其复杂的形式和特征表现,目前还不能用单一物理量来描述或预测地面运动特征。因此有必要探索新途径以概括特殊的地震运动形式;(4)当前在工程实用上,迫切需要更为简便易行的法则,预估在未来地震影响下场地地面运动的特殊性影响,即使是定性的或半定性的,也会有助于认识问题的实质。

为说明上述问题,这里举出一些震害实例,借以反映场地运动的特定影响。

1. 节律性破坏

这种破坏形式在唐山地震时,滦县发生的情况比较明显。滦河大桥(照片1)为36跨的大型钢筋混凝土公路桥,在1976年7月28日唐山主震中遭到了破坏,但当天尚能行车,及至当晚发生7.1级强震时,第一次隐伏性灾害就爆发成毁灭性灾害,使大桥24跨梁落墩倒。当详细观察其破坏情况时,就会发现桥墩的破坏呈轻重相间。这座桥梁震害的特征是:(1)在一定长度范围内呈现节律性破坏;(2)这种节律性破坏具有累积和继承的

* 1980年7月3日收到初稿;1981年6月1日收到修改稿。

特点,即在主震中遭受破坏部位,又在其后的强震中继续遭受破坏,即所谓积累损伤;(3)桥梁中部较其两端的破坏有明显加重的趋势(只当桥梁的长度小于波长时例外).而接近河床中心的部位破坏最重;(4)照片 1 中,桥的右侧震害重于左侧,且桥面板均倒向右侧.这显示了主震相地震波的明显方向性.由于滦河河床断面的不对称性,致使桥梁落架的那一段长度的中心向右偏移,实际上恰与河床断面的轴心位置对应.

上述震害实例反映出来两项规律,一是节律性破坏;二是震害的重复性或继承性.这些规律则来源于场地运动的固有特征.

2. 扭矩分量的破坏

地震横波在界面上发生偏振而派生的两种面波中具有更大破坏作用的是 SH 波.由于勒夫波可造成水平界面上质点大幅度振动,所以对于地面上的建筑物容易产生不同相位的扭转.即地震惯性力并非同时均匀地作用在建筑物基底,而是以不同的幅值作用在建筑物或其他工程设施的基底各点上,因而产生扭矩.这里举出在强震震中区经常见到的破坏形式,用以说明这种形式的破坏特点.

照片 2 是唐山地震造成的铁路路轨扭曲.它清楚地“记录”下来在主震相振动中该场地运动的特殊形式——以水平偏振 SH 波为主的扭转运动,造成铁轨大幅度变形,反应了当时的扭振波型.可以看出,它是在有限长度内发生的,铁轨扭曲的“波长”似小于一般土层的 SH 波长.根据宏观调查分析,铁轨通过道渣铺设于地面,其振动性状主要取决于地面运动波型,而不决定于其本身的振型,但是铁轨毕竟有较大的水平刚度,所以它实际上可能是以一种复合振动的形式出现,并残留下来大幅度变形.

在震中区还可以见到大量的扭曲破坏实例,发生在很小的范围内.如照片 3 中的烟囱(唐山第四疗养院)以及照片 4 中所示的门柱(唐山市第二招待所)扭转,都表明是在很小面积上的扭矩破坏.

更为典型的实例是照片 5 所示建筑物的破坏.该建筑物是矿冶学院图书馆四层砖混结构书库,由于强烈的水平扭矩将底层彻底摧毁.由于墙体抗扭刚度不够,底层墙体完全崩溃,形成了不连续的结构,从而上部三层结构得以保存,特别是第三、四两层基本无损.此书库残存的三层结构在原有位置水平扭转了一个明显的角度.照片 5 中 A 点所标的书库一角其水平位移只有约 0.5 米,而在书库的 B 角,则约有 1.5 米的水平位移.底层的彻底摧毁与上层的基本完好形成鲜明对照.它使人相信这种破坏是在极其迅猛的扭剪作用下瞬间发生的,在上部结构还没有发生相应的协同运动之前,底层已被摧毁.

这种破坏的另一特征是,被损坏的部位常在结构物的底部(照片 3)或中部(照片 2),而不可能在最上部,因为结构上部的质量有限,不足以提供强大的扭矩惯量.

3. 强烈竖向力的破坏

国内外的抗震设计,迄今都是用水平地震力来控制和验算设防措施的.这对于大多数远场地震作用来说是适合的.但是,通过强烈地震极震区的宏观调查,可以看到许多震害不是由地震水平惯性力造成的,而是被强烈的地震竖向力所致.照片 6 是唐山机车车辆厂的砖烟囱,它的破坏形式极为奇特,按着它的横向铁箍被压碎成八段,形似叠放在一起的饭碗,而其顶部一段约 5 米长跌落地面.总括来说,该砖烟囱的破坏特征是:(1)多段破损,但同时并存;(2)每段断口呈 X 形交叉;(3)上段嵌入下段,破坏形式呈碗状.综

合这几个特征,只能认为是竖向地震荷载导致的破坏,而X形交叉断口则是在超过砖筒极限抗压强度的竖向荷载作用下产生的剪切破裂面。

在极震区还可以见到另一种形式的竖向地震运动结果,照片7为铁路路轨遭受地震竖向运动摧毁的情形。它至少可以说明,在该场地上的地震运动是以垂直向为主的,且其运动形式十分接近于瑞雷波的作用。由于铁路的垂直刚度较小,在地面波动中它基本上依附于地表层,而在振型上二者相符。在这种情况下,铁路残留的变形能大体上反映瑞雷波传递过程中的波形。

4. 共振破坏

共振破坏的普遍意义在于,大多数具有一定规模(体型、荷载或占据的空间等)的工程设施的震害,都可以说是某种程度的共振破坏,而单论地基土质软硬,并不能反映场地地震效应上的利弊。照片8(a、b)为发生在宁河县城建局院内呈鲜明对照的两个结构物。其一是在唐山地震中完全摧毁的大型砖筒水塔。另一个则是依然屹立的三层砖混结构的办公楼。

另一个典型实例示于照片9(a、b)。该照片表明阎庄子大桥遭受了巨大的地震运动。造成大型桥面板的飞起叠落。然而位于河旁的单层民房却安然无损。说明地震运动尽管强烈,但常常有选择地破坏某些类型的工程设施,而对另外一些建筑则大体无犯。

5. 波动的聚能破坏

波的聚能可以通过波的反射聚焦,干涉波幅叠加和衍射能量转换等多种形式表现出来。它虽不属于因频率成分相同或相近而产生的共振,但在效果上两者都是振动幅值叠加的结果。聚能作用不仅表现于地震断裂的影响场和液化区宏观形迹的形成,而且也表现在对工程设施的破坏等多方面。这里举出的例子可以从更为广泛的意义上来说明问题。

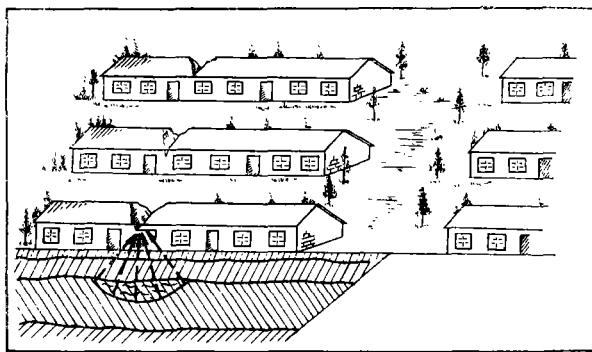


图1 地震聚能破坏实例

图1为1966年邢台地震震中区宁晋棉油厂单层房屋出现的奇特景象:该数排房屋系完全相同结构的建筑物,地震时仅在靠近左端的三排屋盖上出现严重震害,屋盖局部塌顶,檐墙中部倾倒,屋架下落,三排房屋均在同一部位损毁,犹如斧砍刀切一般。值得注意的是:(1)严重损毁的屋盖及墙体正下方,却见不到丝毫震害迹象,墙体裂缝到窗台以下即行消失。显然不是地基失效或失稳所致。(2)三排房屋的其它部位完整无损,特别是两

端山墙直立未闪, 檐角未裂, 说明这些房屋在地震运动中未经受剧烈的摇晃。上述两点似乎排除了房屋震害是由于地基破坏或地面剧烈振动的可能因素。

为查明原因, 我们在房屋的“震毁线”上进行了勘探, 结果发现, 在地面下与“震害线”吻合着一条古河道。河床中淤积的有机质亚粘土早已固结成坚硬状态, 但仍保持了一个界线分明的河床断面, 如图 1 所示。如果将包括古河床断面的地基连同其上的单层房屋作为一个整体来看, 则可设想通过河床断面向上入射的地震波, 经弧形界面的复反射聚能作用, 可能在屋盖被毁部位形成聚能破坏。

上面列举的一些震害实例, 有些显然不能通过现有的一般动力反应分析出, 或从谱曲线上反映出导致其破坏的原因。用数值计算法(有限元法等)又因复杂条件的多解性而无法概括这种宏观规律。因为那些宏观震害是场地、地基、建筑物处于一个大范围的或者在一个波动场作用下的整体表现。只研究质点的运动规律, 不能容纳一个大空间运动特性。

二、场地波动的基本分析

上述一些震害的背景材料说明, 很多工程设施的破坏都是由于场地波动在特定条件下产生的特殊效应所致, 下面我们简略地从场地波动作用予以说明。

1. 波动的聚能作用

场地在波动场的影响过程中, 传播波动的介质质点都以其自身的平衡位置为中心做往复振动, 因而介质本身就必然产生变形而吸收这种动能, 并转为本身的势能。所以波动本身就是一种能量的传递过程。

设在弹性半空间中的一个单元体的体积为 dV_0 , 密度为 ρ , 则该单元体的质量为 $dm = \rho dV_0$ 。当波动以速度 V_s 传至其处时, 使其获得动能为:

$$dW_d = \frac{1}{2} dm \cdot V_s^2 \quad (1)$$

另外, 波速亦可以从位移的导数求得, 当波为简谐运动时, 则

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial [A \cos \omega(t - Z/V_s)]}{\partial t} \\ &= -A \omega \sin \omega \left(t - \frac{Z}{V_s} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式, 得

$$dW_d = \frac{1}{2} (\rho dV_0) A^2 \omega^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{Z}{V_s} \right) \quad (3)$$

单元体在振动的同时因弹性变形而获得弹性势能, 此能量恰与动能相等(设无阻尼运动), 即

$$dW_p = \frac{1}{2} \rho dV_0 A^2 \omega^2 A^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{Z}{V_s} \right) \quad (4)$$

因此, 单元体的总能量为:

$$dW = \rho dV_0 A^2 \omega^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{Z}{V_s} \right) \quad (5)$$

通常波动能量是以单位体积介质中的能量为单位, 叫做能量密度 w , 即

$$w = \frac{dW}{dV_0} = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{Z}{V_s} \right) \quad (6)$$

在每个振动周期中, $\sin^2 \omega \left(t - \frac{Z}{V_s} \right)$ 的平均值为 $1/2$, 所以平均能量密度为

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \quad (7)$$

从上述推导, 可以看出波动能量具有下列特点:

(1) 波动能量与一般简谐振动的能量不同, 在单一的谐振系统中, 动能与势能是相互转换关系, 即动能最大时(相当于波节)势能最小, 而势能最大时(相当于波峰), 此时动能为零。但波动能量则不论何时都是动能、势能同相地叠加, 即同时最大或同时为零。其能量值的升降本身就反映出波动的特点。

(2) 波的能量与波幅(A)的平方, 圆频率(ω)的平方和介质的密度三者均成正比。

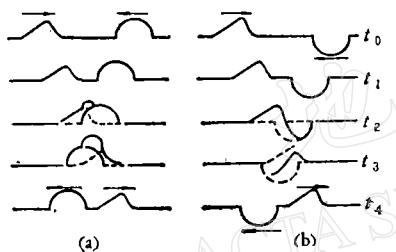


图 2 不同形、相的波动干涉示意

(a) 异形同相
半波叠加。
(b) 异波反相半波叠加。

因此, 波在干涉中的幅值叠加代数和, 可以直接反映波动能量的增减, 由于平方的关系, 变化得特别显著。图 2 为两个单波波幅的叠加情况, 可以看出, 当在 t_2 和 t_3 时刻中, 其波动能量是非常巨大的。如果在地震波的随机作用下, 干涉的波动能量远较单波来得剧烈和复杂。这就是经过干涉的波动具有较大破坏力的原因。

2. 封闭的场内地波的干涉作用

波的干涉可以在多种条件下产生, 而且有多种形式, 这里需特别指出的是, 这类干涉在封闭场内地

会产生什么效果。这里指的封闭场地是指波的传播方向上介质是有限的或有边界的, 如湖泊、河谷、河床(不论是否为间歇性的), 以至池塘等。这些都是属于本身就带有边界的。还有一种情况是场地本身虽属平坦而连续的, 但其周围则被地貌边界所局限, 如河曲的凸岸、山间小盆地、以至大型冲沟等。

在上述的封闭场地上, 由于地面形态的起伏变化, 在边界处的地震波动会受到局部的影响, 而受影响最大的是沿地面传递的瑞雷波与勒夫波。

如果封闭的场地是两岸对称的河床, 由基岩垂直向上输入的地震波所激发的表面波会在河床两岸产生向心的反射作用, 从而将产生驻波, 结果造成振幅的直接叠加。如果是在一河曲的中心部位, 且凸岸规模既不过大(否则在传递过程中幅值衰减), 也不过小(最小有 5—6 个波长), 以便形成波在圆形或弧形的边界上的衍射。这种衍射与光波的典型衍射作用具有很大的相似性。图 3 为半圆形地貌边界以内场内地震波动的衍射作用。据衍射理论可以证明, 在直角坐标

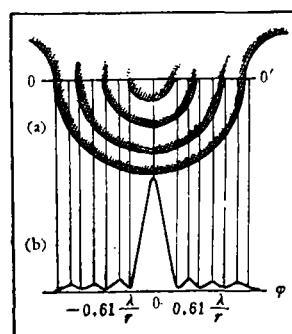


图 3 半圆形地貌边界内波动衍射

的中心部分出现了最大幅值，其所对应的距离为 $\pm 0.61 \frac{\lambda}{r}$. λ 为波长， r 为圆半径。这种现象犹如一盆液体在受垂直方向振动时液面呈现的振荡一样，通常在河曲部位沉积有软土或松散砂层，特别是当砂层开始液化后，其所在场地的地面运动，就与这里提出的圆形衍射极为近似。

另一种干涉常发生在河床中，即地面运动经河流两岸的凸起岸堤而向河心反射。如果河岸地形及地层岩性相同，即意味着反射波动的频率特性相似，在这种情况下就会产生驻波。如果河堤不对称，地形及地层岩性亦不相同，则反射波动虽不具备驻波的条件也将产生某种形式的干涉，其结果仍不免在一定的波节上形成幅值的叠加。图 2 可被认为是这种波动干涉的一个特例，假设两个行波来自相对方向，当他们相遇时，亦将产生幅值叠加，同时引起波形畸变。其结果不仅加剧了振动强度，而且在畸变波动中产生偏振，使场地上工程设施遭到更为复杂的摇晃，因此决不能低估这种干涉的破坏作用。

从上述两种形式的震害与盘山大桥及滦河大桥的节律性破坏过程来看，主震及强余震的影响都表现在固定的孔位上加剧了振动，所以震害表现了继承性和累积效果。据简略估计，桥梁的破坏节律大体与面波波长相当，通常在河床上层的波速变化不大，故从两岸岸堤反射的行波波长及波速可认为基本一致，因此有可能据河床上层波波长预估节律性破坏的位置，以便在桥梁的相应部位上加强抗震措施。

3. 建筑物长度与场地运动的关系

设地表振动是以谐和波的连续波动形式传播，来考虑沿建筑物长轴方向的波动分量与建筑物振动的关系。建筑物与地基两者相接在一起理应做协调运动，然而如两者的振动特性相差悬殊，则在场地运动中必将产生不协调的波动。如建筑物吸收能量越多，其损毁程度也必然增大。现试从输入地震波的损失^[1]来分析这个问题（图 4）。

设地表传递的波动方程为：

$$u = u_0 \cos \frac{2\pi}{4} \left(t - \frac{T}{L} x \right) \quad (8)$$

式中：
 u ——地面振动位移量（振幅）

u_0 ——地面振动的最大振动

T ——地面振动周期

L ——地面振动波长

x ——地面振波波动方向上某点的座标

t ——地面振动的某一时刻

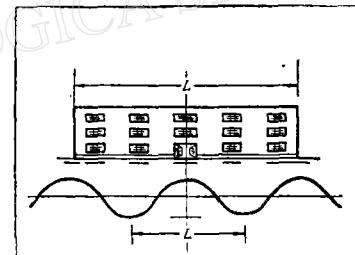


图 4 建筑物长度与地面运动波长的对比

为求其上建筑物的振动位移量 u ，可将建筑物视作相对刚性的，故可用平均位移量 \bar{u} 代替整个建筑物的振幅 u ，于是

$$u = \bar{u} = \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} U_0 \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{L} x \right) dx \quad (9)$$

可认为其最大位移出现在 $t = 0$ 时, 则

$$\begin{aligned} u_{\max} &= \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} U_0 \cos \frac{2\pi}{L} x dx \\ &= U_0 \frac{L}{\pi l} \sin \frac{l}{L} \pi \end{aligned} \quad (10)$$

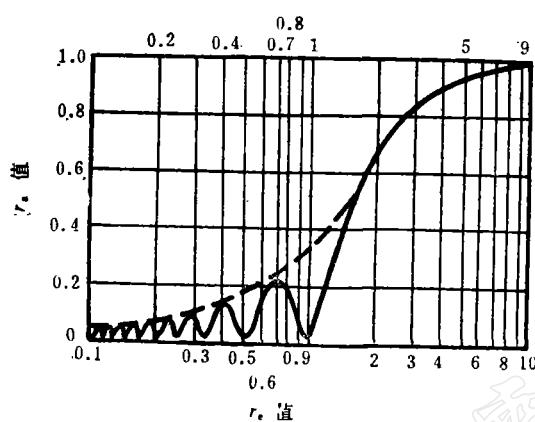


图 5 建筑物长度与波长之比对谐调振动的影响

由上可知, 只有当建筑物长度 l 远小于地振动波长 L 时, 建筑物才会与地基一并做等幅谐和振动。这时建筑物的振幅虽然最大, 但在建筑物长轴方向上的各点振动均与地基振动谐调一致, 因而地基不会对建筑物产生任何不均匀振动下的接触压力。亦即建筑物各点的振动基本上是同步和同相的, 在这种情况下, 就可不必考虑建筑物两端在振动中是否会自行碰撞或自行分裂的问题。图 5 表明, 当 $r_l \approx 0$ 时, 即近于理想情况。

反之, 如建筑物长度 l 接近于场地振动波长 L , 两者呈现极不谐调的振动。不论地面振动位移(振幅)有多大, 而建筑物的平均振幅都为零, 或者在建筑物长轴方向上至少有两个点上的振幅为零。在这种情况下, 地基振动激烈地碰撞着建筑物地下结构部分, 或者这种碰撞作用被传到建筑物的上部结构, 并在最薄弱的部位造成损毁。同理, 当建筑物长度 l 大于波长 L 时, 这种碰撞作用仍将发生多次, 如图 5 所示的 $r_a \approx 0$ 各点上, 都是最为不利的长度比。

上述作用, 亦可通过水波对水上船体的撞击作用加以比喻, 如图 6 所示, 当船体受迫振动, 而其长度或自振周期较长时, 必然有波浪撞击, 只有船长远较波长为小时, 船体才会与波浪同步地起伏, 而不会在船身上产生冲击的浪花。

因此, 设计某些对抗震要求极为严格的建筑物时, 应首先预测场地运动中面波的波长, 当建筑物长度必须超过波长时, 宜将结构部分适当分开或做柔性连接, 以免遭受更大的震害。

而 $U_{t=0} = |U_0|_{x=0}$

今设: $r_a = u_{\max}/U_0$

$r_l = L/l$

$$\therefore r_a = \frac{r_l}{\pi} \sin \frac{\pi}{\gamma_l}$$

当 $L \gg l$ 时 $r_l \rightarrow \infty$

$$\lim_{r_l \rightarrow \infty} r_a = \lim_{r_l \rightarrow \infty} \frac{\gamma_l}{\pi} \sin \frac{\pi}{\gamma_l} \approx 1 \quad (11)$$

当 $L = l$ 时, $r_l = 1$

$$r_a = 0$$

当 $L \ll l$ 时, $r_a = 0$

$$\lim_{r_l \rightarrow 0} r_a = \lim_{r_l \rightarrow 0} \frac{\gamma_l}{\pi} \sin \frac{\pi}{\gamma_l} \approx 0 \quad (12)$$

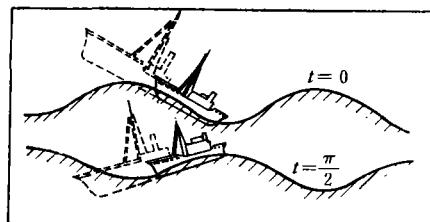


图 6 船体受迫振动大小决定于相对的周期或长度

三、结语

研究场地的整体运动特征,对于认识和掌握一次强烈地震中出现的地面震害规律,具有重大的意义和作用。

鉴于目前关于地面运动的分析理论和方法尚局限于地面上质点的运动反应,它无法概括大面积的场地整体运动的特殊形式,因此,本文试图从波动场的角度来认识和掌握某些特定的场地运动规律,并联系到工程抗震的措施方面。这是一项新的探索,自然也是极其初步的研究。

在研究过程中,得到铁道科学研究院抗震室、公路规划设计院抗震室以及中国科学院工程力学研究所有关同志的帮助,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 山原浩,地震時の地動と地震波の入力损失,日本建築学会論文報告集,1964.

THE BEHAVIOR OF GROUND MOVEMENT OF A SITE AS A WHOLE DURING EARTHQUAKES AND ITS POSSIBLE EFFECTS ON ENGINEERING CONSTRUCTIONS

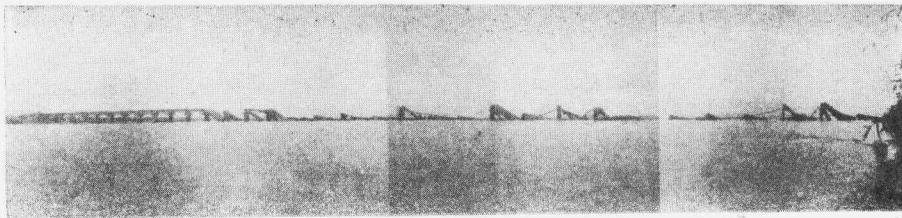
WANG ZHONGQI ZHAO SHUDONG

(Chinese Academy of Building Research)

Abstract

This paper attempts to deal with an important aspect which so far has not been taken up seriously, i.e. the waving behavior of a site as a whole, during major earthquakes which have definite effects on damaging of engineering constructions, and in turn such waving behavior will depend upon the geological and topographic conditions of the site.

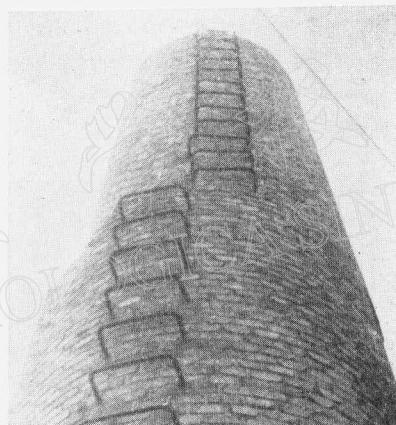
In this paper, several types of patterns of damaging of ground surface have been given by actual examples. They show that each site sways as a whole in a definite manner during earthquakes, causing engineering constructions on ground to be damaged in the same manner. Such a ground movement can hardly be described by the existing methods of seismic response analysis for a mass point on ground. Thus the authors try to make a tentative study from the view point of waving of a site, so as to give some new idea regarding the anti-seismic problems to be discussed accordingly.



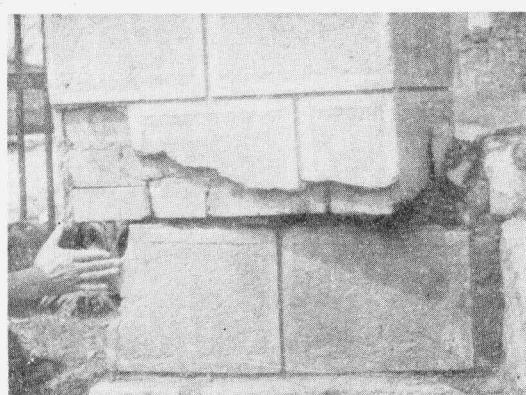
照片 1 1976 年唐山 7.8 级与 7.1 级地震后滦河大桥桥墩的节律性破坏



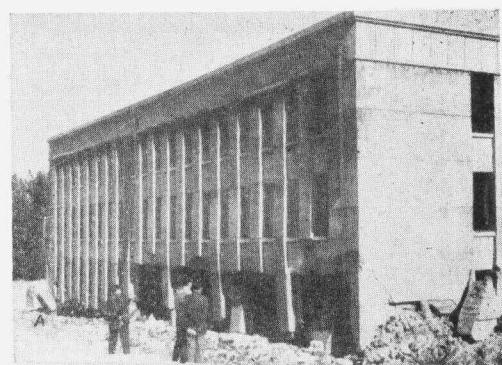
照片 2 地震的水平扭矩分量
造成铁轨的扭曲



照片 3 砖烟囱的扭转破坏



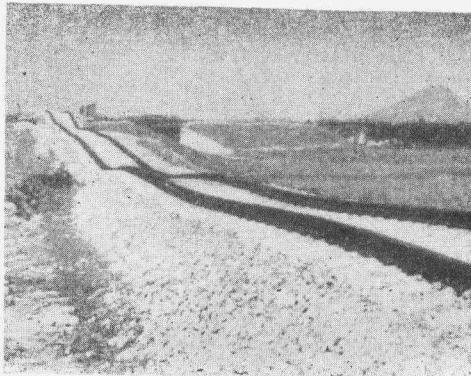
照片 4 门柱被扭剪成两段



照片 5 唐山矿冶学院书库的扭剪破坏



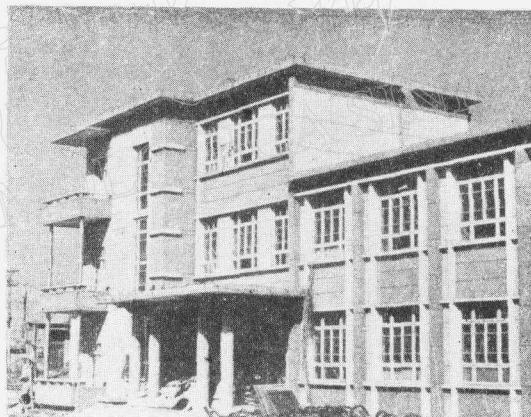
照片 6 砖烟囱被竖向
地震力压碎



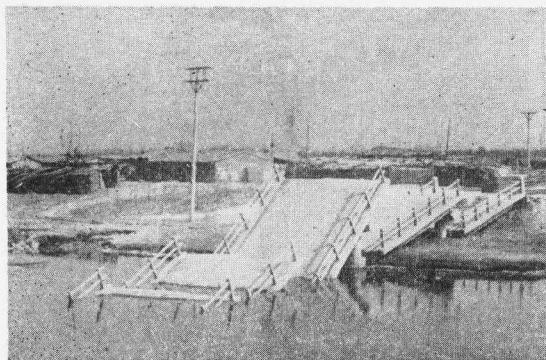
照片 7 竖向地面运动造成的铁路路轨破坏



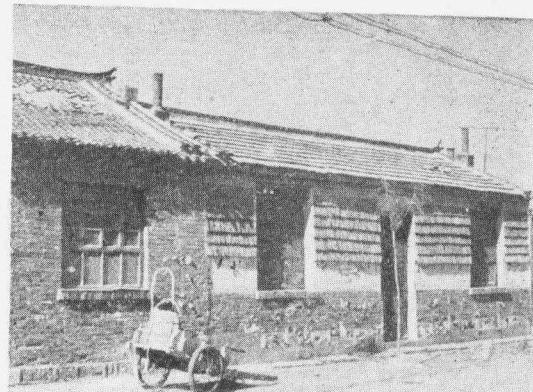
照片 8(a) 宁河城建局院内大型砖筒水塔
被震毁(但单层砖房无损)



照片 8(b) 同一院内的三层办公楼安然屹立



照片 9(a) 阎庄子大桥遭受地震的共振作用而毁灭
(但其背岸上的砖砌库房无损)



照片 9(b) 临近大桥河岸的单层民房安然无损