

地震液化条件下重力式码头的变形破坏机理

方云¹, 东烟郁生², A. Ghalandarzadeh², 织田隆志²

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 东京大学, 日本东京 113-8656)

摘要: 现场调查发现神户地震期间重力式码头破坏时都发生了相当大的侧向位移, 因此, 阐明挡土墙的变形机理对于改善抗震设计具有十分重要的意义。为此, 根据相似原理设计了重力式码头的地基模型, 进行了一系列的振动台试验。试验结果表明: 基底土的强度降低和局部液化是挡土墙变形破坏的主导因素。墙后动土压力的增加为挡土墙的运动提供了条件。在液化条件下重力式码头地基的运动以侧向位移为主。重力作用是地基侧向运动的主要影响因素。减少作用于挡土墙上的动土压力和充分填实基底下的砂土是增加重力式码头抗震稳定性的重要措施。

关键词: 重力式码头; 振动台试验; 地基; 液化。

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)04-0415-04

作者简介: 方云(1955—), 男, 副教授, 1985年获中国地质大学(北京)工程地质专业硕士学位, 1994—1995年为日本东京大学访问学者, 主要从事土动力学和岩土工程方面的教学和研究工作。

地基液化引起的永久性位移破坏是岩土工程领域的重要研究课题之一^[1]。1995年日本神户地震使神户港的许多重力式码头和邻近的人工岛挡土墙由于地基液化而遭到了严重的破坏。挡土墙后的饱和充填砂土和基底下伏砂土, 发生了相当大的永久性侧向位移。实际观察到的挡土墙的最大侧向位移量达 3.3 m^[2], 垂直沉降量达 0.5 m。为了阐明挡土墙在地基液化时的变形破坏机理, 进行了一系列模型地基的振动台试验, 来模拟神户港码头地基在地震液化条件下的动力特性。本文给出了某些观察结论, 提出了改进重力式码头抗震设计的新思路。

1 地基模型和试验方法

图 1 为试验采用的地基模型的轮廓。地基模型是根据相似原理按照神户港重力式码头的实际地质剖面缩小比例尺设计的。几何模拟系数为 1/64。试验盒采用透明的有机玻璃板制成, 尺寸为长 200 cm、宽 40 cm、高 60 cm。在整个振动试验过程中可以清晰地观察到地基变形的全过程。采用一个装满密实饱和砂土的木盒来模拟重力式挡土墙。墙后和墙

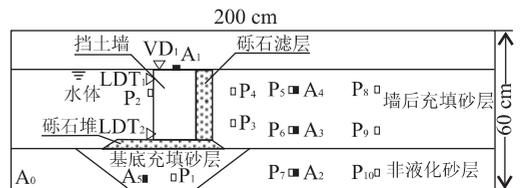


图 1 模型轮廓

Fig. 1 Configuration of model

A₀—A₅, 加速度传感器; P₁—P₁₀, 孔隙水压力传感器; VD₁, 垂直位移传感器; LDT₁, LDT₂, 侧向位移传感器

底铺设砾石滤层和疏松的砂层。地基中装置了许多不同类型的传感器(见图 1)。为了测定振动液化过程中挡土墙后土压力的变化情况, 在有些试验中还在挡土墙背安装了土压力传感器。

地基模型被置于一个振动台上。本次试验采用的振动波形为正弦波, 激振频率分别为 3, 5, 10 Hz, 激振加速度为 130~880 cm/s²。采用日本 Toyoura 砂来制备模型地基。Toyouura 砂为均匀细砂, 平均粒径 $d_{50}=0.17$ mm, 不均匀系数 $c_u=1.39$, 最大孔隙比 $e_{max}=0.977$, 最小孔隙比 $e_{min}=0.597$ ^[3]。

制备模型时首先采用干砂在试验盒中铺置非液化层。使干砂振动加密, 形成孔隙比为 $e=0.64$ 的密实非液化砂层。然后模拟实际地质剖面, 挖去重力式

挡土墙下的部分土层,用具有 5% 含水量的砂置换这部分土(图 1). 在铺设置换砂的过程中采用一个击实器分层击实. 本次试验控制的基底土的孔隙比 $e_{\text{sub}}=0.62\sim 1.06$. 在基底土上铺置砾石基底,并放置模拟重力式挡土墙的木盒. 在木盒两端抹上油脂,以尽可能减少木盒两端与试验盒两壁之间的摩擦阻力. 最后在挡土墙之后分层充填砾石滤层和 5% 含水量的砂. 本次试验控制的墙后填土的孔隙比 $e_{\text{back}}=0.84\sim 1.04$.

一个按正弦变化的水平激振力被施加到制备好的模型上. 在不同的试验中采用了不同的激振加速度幅值. 振动时间延续约 15 s. 观察试验过程中挡土墙和地基土的运动情况. 停止振动后,继续观察随超静孔隙水压力消散产生的地基沉降,至超静孔隙水压力消散完毕后终止试验. 所有的试验数据采用计算机自动采集处理,并输出最终成果.

2 试验成果与讨论

不同类型的传感器提供了挡土墙、基底土层和墙后填土在振动过程中动力反应的大量信息. 当振动剪应力传递进入基底土和墙后填土之后,引起超静孔隙水压力开始增加,其增量大小和增加速率取决于振动剪应力幅值和土的密度. 墙后填土在大约 2 s 的时间内即达到 100% 的液化状态. 这种液化状态一直保持到振动完全停止. 在振动过程中超静孔隙水压力的增加,使墙后填土和基底土强度降低. 而墙后土压力的增加,给挡土墙提供了变形破坏的条件. 挡土墙逐渐丧失稳定性,开始向离岸方向运动,墙后的液化砂层也随之产生流动. 振动完全停止时,挡土墙不再朝前运动. 随着超静孔隙水压力迅速消散,地基土中发生渗流和地基沉降,直至超静水压力完全消散为止.

振动剪应力的大小取决于试验时所施加的激振加速度的幅值. 模型地基中的加速度幅值,在通过饱和砂土层朝上传播的过程中由下至上逐渐衰减.

试验结果表明:在远离挡土墙的填土中(P_8),在最初几次振动循环中超静孔隙水压力即迅速增长至 100% 的液化. 而在墙后砾石滤层部位(P_4),超静孔隙水压力的增加速率较慢,且直至振动停止时尚未达到 100% 的液化. 图 2 给出了模型地基中液化势的分布等值线. 由图可知,100% 的液化区位于远离挡土墙的右侧. 距挡土墙越近,超静孔隙水压力的

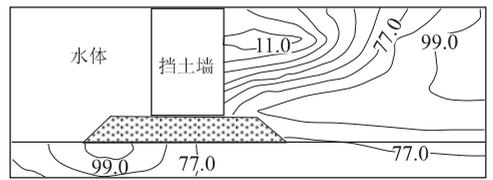


图 2 超静孔隙水压力比的典型分布(等值线间距为 11%)
Fig. 2 Typical distribution of excess pore water pressure ratio

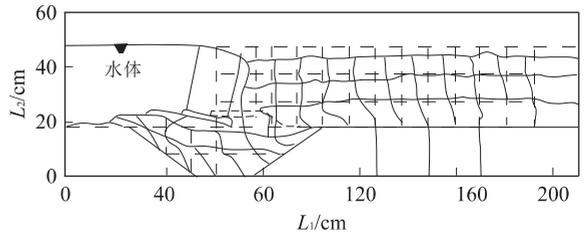


图 3 液化模型地基的变形

Fig. 3 Deformation of liquefied model ground
虚线. 振动前的网格; 实线. 振动液化后地基土的流动变形结果

增幅越小. 由于墙后砾石滤层具有较好的排水条件,能迅速消散超静孔隙水压力的积累. 由此可知,墙后的砾石滤层在一定的范围内能够起到减低液化趋势的作用. 另外,墙的朝前运动可能对孔隙水压力的变化也有一定的影响. 在挡土墙前部的基底土中还存在一个液化区. 由于上覆压力较小,该区域内的疏松基底土很快就产生了液化. 墙趾附近地基土的这种局部液化破坏,有助于墙的侧向运动.

制备模型时在基底土和墙后填土中采用染色的砂打好网格,振动过程中网格的变形清晰地描述了地基的变形破坏形态. 由图 3 可知,在墙后填土的液化砂层中,侧向位移的幅值由下至上逐渐增大. 在填土表面处侧向位移量最大,而在填土层底部侧向位移几乎为零. 侧向位移量沿垂直方向的变化,可近似采用正弦函数来描述. 而在水平方向上,离挡土墙越近,侧向位移值越大. 在墙后填土与墙下基底土接触的部位,土体的运动方式取决于基底土的密度. 当挡土墙下基底土的密度小于墙后填土的密度时,墙后填土在液化流动过程中朝下运动,挤入基底土中(图 3). 挡土墙下的砾石垫层和基底土在挤压作用下向前被推出地表,墙前的地基表面上抬升. 在整个变形破坏的过程中,地基内部产生了一个贯通下伏土和墙后填土的似圆弧形隐伏滑动面(图 3).

在填土向下运动的同时,墙前的水体则越过挡土墙流向填土顶部. 本次试验中观察到的液化砂层

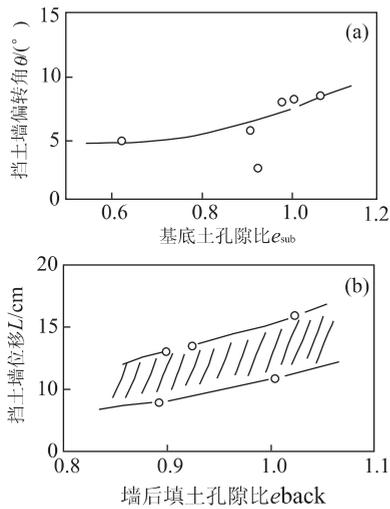


图 4 孔隙比对挡土墙运动的影响

Fig. 4 Effects of void ratio on movement of retaining wall

特性非常类似于粘滞液体. 正如 Towhata 等^[4]指出的, 液化砂层的运动方向主要受总的水头梯度所控制. 而总的水头梯度取决于总的上覆压力和高程水头.

整个振动过程中, 非液化下卧层和填土层之间没有产生滑动, 填土层下的非液化层未产生任何方向的运动. 而挡土墙前水体之下的非液化层, 由于上覆压力较小而发生剪胀作用, 土体积增大, 在振动过程中随着疏松的下伏土层一起朝上运动, 地基表面略有升高. 挡土墙的垂向位移表现为连续的沉降运动, No. 4 模型实测挡土墙的总沉降量为 2.1 cm, 墙底的侧向位移量为 11.0 cm, 墙顶的侧向位移量为 7.5 cm, 挡土墙在侧向移动过程中发生了顺时针方向的转动, 偏转角为 8° . 本次试验中除 No. 1 模型外, 挡土墙在侧向运动时的偏转角均小于 10° . 由图 4a 可知墙的偏转角随下伏土的孔隙比而增加, 即下伏土越疏松, 偏转角越大. 观察结果还表明: 侧向位移量随墙后填土孔隙比的增加而增大(图 4b).

对 25 个模型试验结果进行统计分析, 可将液化时挡土墙的倾斜破坏分为向后翻转和朝前倾覆两种类型(图 5). 在向后翻转的情况下, 挡土墙和周围的土体一起运动, 在土体内部产生近似圆弧状的滑动破坏(图 5a). 此时下部土体的水平位移大于近地表处的土体. 而在朝前倾覆的情况下, 墙趾朝下贯入基底土中, 近地表的土体水平位移大于其下部的土体(图 5b).

上述研究表明: 地基模型的运动以侧向位移为主, 位移方向朝向离岸方向表明重力作用是地基运

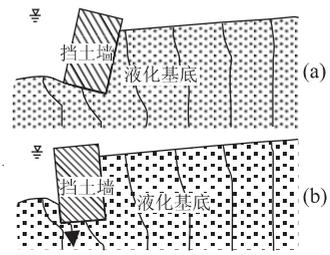


图 5 挡土墙的倾斜破坏类型

Fig. 5 Types of tilting failure of retaining walls

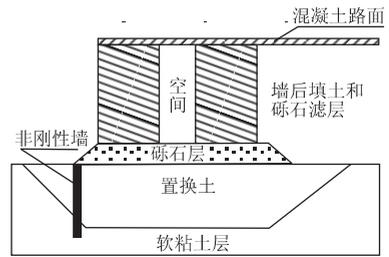


图 6 减缓地震期间变形破坏的措施

Fig. 6 Mitigation of deformation and failure during future earthquakes

动的主要影响因素. 挡土墙在振动液化过程中的变形破坏主要取决于基底土和墙后填土的动力特性. 由于墙后填土在振动过程中的收缩特性, 只有基底土起着抵抗墙体运动的作用. 随着超静水压力的增加, 基底土强度降低, 并在墙趾附近产生局部液化, 使挡土墙失去稳定. 墙后动土压力的增加, 为挡土墙的运动提供了条件. 墙后液化土层在重力作用下随着挡土墙一起产生侧向流动. 这就是挡土结构物在地基液化条件下的变形破坏机理.

3 重力式挡土墙的改进设计

鉴于目前的设计规范不能解决强烈地震对神户重力式码头的破坏, 世界各国的土力学者提出了许多抗震设计的新思路. 根据上述观察结论, 笔者提出采用隔震墙来改善重力式码头的抗震性能, 具体措施如下(图 6): (1) 用双层式重力式挡墙, 中间预留一定的空间以避免动土压力传递到重力式码头之上, 动土压力容许在一定程度上变形的第二挡墙支撑. (2) 基底下砂土的流失会导致重力式码头的倾斜, 因此, 在砾石堆坡趾处设置一个垂直的非刚性墙体, 以防地震液化时砂土的流失. (3) 将基底下的置换砂土充分填实, 增加其抗震稳定性.

4 结论

(1) 墙后填土在远离挡土墙的区域能迅速液化, 而靠近挡土墙的地方超静孔隙水压力增加较慢, 说明墙后砾石滤层能够起到降低液化趋势的作用。(2) 模型地基的运动以侧向位移为主。挡土墙朝向离岸方向的运动, 表明重力作用是地基运动的主要影响因素。(3) 基底土的强度降低和局部液化是挡土墙变形破坏的主导因素。墙后动土压力的增加为挡土墙的运动提供了条件。(4) 模型试验表明: 重力式码头设计规范不能避免强烈地震造成的码头结构破坏。其改进设计的原则是减少作用于挡土墙上的动土压力和充分填实基底下砂土。

参考文献:

- [1] Ishihara K. Characteristics of lateral spreading in liquefied deposits during the 1995 Hanshin-Awaji earthquake [J]. *J of Earthquake Engrg*, 1997, 1(1): 23-55.
- [2] Inagaki H, Iai S, Sugano T, et al. Performance of caisson type quay walls at Kobe Port [J]. *Soils and Foundations*, 1996, Special Issue: 119-136.
- [3] Ghalandarzadeh A, Orita T, Towhata I, et al. Shaking table tests on seismic deformation of gravity quay walls [J]. *Soils and Foundations*, 1998, Special Issue: 115-132.
- [4] Towhata I, Sasaki K, Tokida K, et al. Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle [J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(3): 97-116.

MECHANISM OF DEFORMATION AND FAILURE OF GRAVITY-TYPE QUAY WALLS UNDER EARTHQUAKE LIQUEFACTION

Fang Yun¹, Ikuo Towhata², Abbas Ghalandarzadeh², Takashi Orita²

(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan*)

Abstract: The field investigation found that seismic damage to gravity-type quay walls during Kobe earthquake consisted of tremendous lateral displacement of retaining walls. It is very important to clarify the mechanism of the wall displacement in order to improve the aseismatic design. For this purpose, a model of gravity-type quay wall ground based on the principle of similitude was designed and a series of shaking table tests are carried out in present study. The test results indicate that the strength decrease and local liquefaction of subsoil are the leading factors in the deformation and failure of retaining walls. The increase of dynamic earth pressure in the back of structure provides the movement condition for the structure. While the movement of the ground mainly manifest as the lateral displacement under liquefaction and the gravity is the leading factor in the lateral movement. It is very significant that the dynamic earth pressure is decreased and the foundation sand is fully compacted to increase the stability of gravity quay walls during future earthquakes.

Key words: gravity-type quay wall; shaking table test; ground; liquefaction.